

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

# IMPLEMENTACE ŘÍDICÍCH ČLENŮ PRO MOBILNÍ KRÁČIVÝ ROBOT

IMPLEMENTATION OF THE CONTROLLERS OF A MOBILE WALKING ROBOT

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
DIPLOMA THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**BC. LUKÁŠ KRAJÍČEK**

**VEDOUcí PRÁCE**  
SUPERVISOR

**ING. VÍT ONDROUŠEK, PH.D.**

BRNO 2012



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automatizace a informatiky

Akademický rok: 2011/2012

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Lukáš Krajíček

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Aplikovaná informatika a řízení (3902T001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Implementace řídicích členů pro mobilní kráčivý robot**

v anglickém jazyce:

### **Implementaion of the controllers of a mobile walking robot**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na návrh a implementaci elementárních zpětnovazebných řídicích členů pro potřeby chůze čtyřnohého kráčivého robotu. Jedná se o řídicí člen kontaktu, který je používán pro polohování došlapu nohy na základě lokální geometrie prostředí tak, aby minimalizoval zbytkové síly a momenty působící na těžiště platformy a tím stabilizoval robot. Dále se jedná o řídicí člen držení těla, který maximalizuje heuristickou míru držení těla robotu na základě měření manipulovatelnosti. Je používán pro optimalizaci polohy těla robotu.

Cíle diplomové práce:

- 1, Proved'te rešeršní studii současného stavu problematiky řídicího členu kontaktu a držení těla.
- 2, Navrhněte a implementujte základní řídicí člen kontaktu pro konkrétní čtyřnohý robot. Funkčnost ověřte na předloženém simulačním modelu.
- 3, Navrhněte a implementujte základní řídicí člen držení těla pro konkrétní čtyřnohý robot. Funkčnost ověřte na předloženém simulačním modelu.
- 4, Navrhněte a algoritmizujte činnost složeného řídicího členu tvořeného těmito dvěma základními členy.

Seznam odborné literatury:

-MacDonald W.S.: Legged Locomotion over Irregular Terrain using the Control Basis Approach, Master Project, University Of Massachusetts, Amherst, ,1996

-C. I. Connolly and R. A. Grupen. The applications of harmonic functions to robotics. J. Robotic Systems, 10(7):931–946, October 1993

Vedoucí diplomové práce: Ing. Vít Ondroušek, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne

L.S.

---

Ing. Jan Roupec, Ph.D.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

## ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a implementací řídicích členů pro čtyřnohý kráčivý robot. Výhodou těchto elementárních členů je jejich vyjádření ve formě nezávislé na kinematice a geometrii robotu, což umožňuje jejich použití i pro jiné typy robotů a různé úlohy. V práci je navržen řídicí člen kontaktu, který minimalizuje zbytkové síly a momenty v těžišti robotu a tím je splněno kritérium trojúhelníkové statické stability. Dále se práce zabývá řídicím členem držení těla, který maximalizuje míru postoje těla s cílem optimalizace polohy těla robotu. Nohy robotu jsou po této optimalizaci vzdáleny od svých mezních poloh a tedy mají větší pracovní prostor pro další pohyb robotu. Implementace vybraného řešení pro každý řídicí člen je provedena na matematickém modelu robotu vytvořeného v programu MATLAB. Řídicí členy jsou sestaveny do tzv. báze řízení, s níž lze řešit obecné úlohy řízení robotu simultánní kombinací obsažených řídicích členů. Pro simultánní spouštění dvou řídicích členů byl vytvořen algoritmus, jehož činnost byla dále vysvětlena na vývojových diagramech.

## ABSTRACT

This diploma thesis deals with design and implementation of the controllers of a mobile walking robot. The advantage of these controllers are their kinematics and geometrics independent representation, which allow to use them for different robot types and tasks. In this thesis the contact controller is designed, which minimizes residual forces and torques at the robot's center of gravity, and thereby stabilize robot's body. Next the thesis deals with a posture controller, which maximizes a heuristic posture measure to optimize posture of robot body. Because of this optimization, legs are moved away from their limits and therefore they have more working space for next move. Implementation of the chosen solution is made on the robot's MATLAB mathematical model. Controllers are composed into a control basis, that allows to solve general control tasks by simultaneous combination of contained controllers. The algorithm was created for that simultaneous activation and its operation was explained on flow charts.

## KLÍČOVÁ SLOVA

chůze, kráčivý robot

## KEYWORDS

walking gait, walking robot



## **PROHLÁŠENÍ O ORIGINALITĚ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně dle pokynů vedoucího diplomové práce a s použitím uvedené literatury.

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

KRAJÍČEK, L. *Implementace řídicích členů pro mobilní kráčivý robot*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 57 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Vít Ondroušek, Ph.D.

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Vítu Ondrouškovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při její tvorbě.



## Obsah

	<b>Zadání závěrečné práce.....</b>	<b>3</b>
	<b>Abstrakt.....</b>	<b>5</b>
	<b>Prohlášení o originalitě.....</b>	<b>7</b>
<b>1</b>	<b>Úvod.....</b>	<b>11</b>
1.1	Historie kráčivých robotů.....	11
1.2	Cíle práce.....	11
<b>2</b>	<b>Současný stav řešené problematiky.....</b>	<b>13</b>
2.1	Autonomní systém robotu.....	13
2.1.1	Řízení založené na modelu.....	13
2.1.2	Řízení založené na chování.....	14
2.1.3	Hybridní architektura řízení.....	15
2.2	Využití zpětnovazebních zákonů řízení pro sestavení chování.....	16
2.2.1	Připojení řídicích členů.....	17
2.2.2	Kompozice řízení.....	18
2.3	Báze řízení pro úlohy chůze robotu.....	19
2.3.1	Řídicí člen kontaktu – $\Phi_1$ .....	19
2.3.2	Řídicí člen držení těla – $\Phi_2$ .....	21
2.4	Zhodnocení teoretických východisek.....	22
<b>3</b>	<b>Návrh řídicích členů.....</b>	<b>23</b>
3.1	Zavedení souřadných systémů robotu.....	23
3.2	Řídicí člen kontaktu.....	25
3.2.1	Instance řídicího členu.....	25
3.2.2	Matematický model.....	25
3.2.3	Grafické průběhy.....	27
3.2.4	Shrnutí.....	31
3.3	Řídicí člen držení těla.....	32
3.3.1	Instance řídicího členu.....	32
3.3.2	Matematický model.....	32
3.3.3	Grafické průběhy.....	36
3.3.4	Shrnutí.....	44
3.4	Složený řídicí člen.....	44
3.4.1	Instance složeného řídicího členu.....	45
3.4.2	Kompozitní strategie.....	45
3.4.3	Algoritmus.....	46
3.4.4	Shrnutí.....	47
<b>4</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>49</b>
	<b>Seznam použité literatury.....</b>	<b>51</b>
	<b>Seznam použitých zkratk a symbolů.....</b>	<b>53</b>
	<b>Příloha 1: Konfigurace robotu.....</b>	<b>55</b>



## 1 ÚVOD

V dnešní době jsou roboty aplikovány ve stále složitějších prostředích [1]. Jsou navrhovány pro plnění nebezpečných úkolů, jako je zneškodňování nevybuchlé munice nebo asistence u chirurgických operací [2]. Jinou oblastí použití mohou být pomocné práce v domácnostech. Takové aplikace robotů vyžadují, aby tyto nové systémy byly schopné interakce s lidmi a práce v nestrukturovaných prostředích. Řídicí architektura těchto systémů musí zvládnout neurčitosti prostředí. Navíc, použití v nestrukturovaných prostředích vyžaduje robota schopného vykonávat více úloh za různých podmínek a tím využívat co nejlépe svého komplexního mechanismu a senzorického subsystému [1]. Tato komplexnost a vzrůstající schopnosti v neurčitém reálném světě umožňují nové využití robotů, ale na druhé straně komplikují jejich řízení.

Možnosti těchto systémů ilustrují například robotická vozítka na Marsu. I když jsou tyto systémy velmi omezené a do značné míry využívající dálkové ovládání. Dálkově ovládaný robot je použitelný pouze v určitých situacích, jelikož vyžaduje neustálý dohled operátora, což může vést na horší chování robotu při občasném selhání lidského faktoru [2]. Na druhé straně naprogramování robotu může být také obtížné, jelikož nelze odhadnout možné výskyty neočekávaných skutečností při provozu [1]. Proto je u takových systémů třeba požadovat větší autonomnost systému, aby byl robot schopen vykonávat úkoly nezávisle v otevřeném dynamickém prostředí.

Důležitým hlediskem je výběr vhodných řídicích struktur autonomního řízení robotu, které umožní úspěšně pracovat v otevřeném prostředí.

Kráčivý robot má oproti kolovému robotu hned několik výhod. Asi největší výhodou je možnost překročit překážku na trase robotu. Další výhodou lze najít při pohybu robotu v měkkém terénu. Zde se před kolovým robotem vytváří vlna důsledkem deformace povrchu, která brání jeho pohybu, zatímco u kráčivého robotu tato deformace podporuje trakci robotu [3].

### 1.1 Historie kráčivých robotů

Historie kráčivých robotů je překvapivě dlouhá. První nákresy pocházejí již z 18. století. Až během první světové války se však podařilo zkonstruovat první kráčivý stroj, Millipede, jež byl založen na modifikaci kol a řetězů. Průlom ve vývoji robotů nastal v roce 1966, kdy byl na univerzitě v Jižní Karolíně vytvořen počítačem řízený robot Phoney [4].

### 1.2 Cíle práce

V této diplomové práci je na čtyřnohém kráčivém robotu prezentována řídicí architektura s uzavřenou smyčkou založená na řídicí bázi. Řídicí členy zde používají zákonů řízení, které jsou robustní a stabilní pro různé typy robotů.

Podle zadání jsou v práci řešeny dva základní řídicí členy - řídicí člen kontaktu a řídicí člen držení těla. Stanoveným cílem je pro každý tento člen navrhnout vhodnou potenciálovou funkci tak, aby bylo řízení robotu pomocí těchto členů dostatečně robustní. Dalším cílem je tuto navrženou funkci implementovat na matematickém modelu čtyřnohého robotu a na různých konfiguracích robotu ověřit její vlastnosti. Posledním stanoveným cílem je navrhnout a algoritmizovat složený

řídící člen, pomocí něhož je možné současnou aktivací více řídících členů, navržených dříve, dosáhnout složitějšího chování robotu.

## **2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY**

### **2.1 Autonomní systém robotu**

Aby mohl autonomní robot pracovat v reálném světě, musí být jeho senzorický systém schopen pracovat s neurčitostmi jak prostředí, tak podmínek úloh [1]. Jedním z problémů nestrukturovaných prostředí je, že je obecně nemožné přesně předpovídat závěr každé akce. Z čehož vyplývá, že není možné navrhnout posloupnost akcí, které by vyřešily daný úkol za všech nepředvídaných situací. Proto musí řídicí systém robotu reagovat na neočekávané události on-line [2]. Takový systém řízení může být robustní s ohledem na omezující poruchy a dále se může bez potřeby přepřepínání autonomně regenerovat z jistých typů nemodelovaných poruch.

Autonomní systém robotu musí být rovněž schopen měnit metody řízení v závislosti na nových nepředvídaných okolnostech. To vyžaduje použití adaptivní architektury řízení. Adaptace je zde dosahována různými druhy mechanismů strojového učení. V úlohách, které dovolují dohled operátora, je často vhodné upravit předchozí naprogramované strategie řízení tak, aby mohla být vykonána potřebná úloha. Operátorský dohled není v mnoha případech možný nebo žádoucí. V těchto situacích je potřeba více autonomní systém učení, který umožní upravit strategii řízení v závislosti na prostředí bez vstupu učitele.

Základním požadavkem řídicí architektury autonomních robotů je přítomnost bezpečnostních omezení, které musí být schopny zabránit poškození robotu [1]. Především jsou tato omezení důležitá, když se robot „učí“ nový úkol bez vnějšího dozoru a když musí být výsledky různých akcí určeny na základě metody pokusů a omylů. Mechanismus uplatňující bezpečnostní požadavky však může být užitečný i v převážně dálkově ovládaných systémech, kde může pomáhat redukovat riziko poškození robotu kvůli chybám operátora [2]. Proto by měl mít řídicí systém robotu mechanismus, který omezuje chování systému tak, aby vyhověl především požadavkům bezpečnosti a robustnosti. Což vyžaduje, aby se během procesu učení robot naučil vyhnout se úkonům, které mohou způsobit kritické chování systému.

Architektury řízení autonomních robotů je možno rozdělit např. na deduktivní, reaktivní a hybridní řízení, která představují tzv. biologicky inspirované systémy. Tyto systémy mohou být v různé míře inspirovány pohybem hmyzu nebo třeba až poznávacími schopnostmi lidské bytosti [5]. Jiné rozdělení uvádí Ridderstrom [6], který dělí řízení na deduktivní, hybridní a biologicky inspirované. Jelikož hybridní architektura řízení kombinuje vlastnosti reaktivního a deduktivního řízení, bude v této práci použito rozdělení podle Hubera [2], a to na řízení založené na modelu, na chování a hybridním řízení.

#### **2.1.1 Řízení založené na modelu**

Tradiční techniky řízení založené na modelu a zahrnující optimální a robustní řízení, byly již použity v různých úlohách a systémech robotů [1]. V těchto technikách je jednoduší zákon řízení systému odvozen analyticky na základě kompletního modelu dynamiky prostředí a vzájemného působení řídicího systému a okolí. I když tento přístup dovoluje odvození spojitých řídicích strategií pro danou úlohu, je jejich výkonnost velmi závislá na přesnosti modelu. Podobně i správnost stabilitní analýzy k hodnocení ručně navržených řídicích členů závisí silně na přesném porozumění

dynamiky systému. V obou případech je omezena robustnost strategie řízení v neurčitých a neočekávaných situacích. Pro složité systémy robotů je těžké vytvořit takto přesné a kompletní modely. Navíc jsou otevřená prostředí obecně nelineární, stochastická a nestabilní [2]. Je tedy složité vytvořit jejich model. Jednoduché řídicí techniky toto zcela nepokryjí, proto mají svá omezení použitelnosti pouze na středně složité úlohy a prostředí.

Techniky plánování založené na modelu jsou náchylné na některé stejné problémy. V těchto případech se model používá pro předpovídání výsledků plánování. Jestliže se plán neprovede podle predikce, systému je umožněno přeplánování. Tím jsou tyto techniky o něco více robustnější. Při výskytu neurčitosti však mohou plány selhat, což může vést k častému přeplánování. Navíc je plánování v složitém systému exponenciální a proto opět dobře nepokrývá potřeby autonomních systémů a otevřených prostředí.

Pro rozšíření množiny možných úloh plánování byly zavedeny hierarchické architektury [2]. V této architektuře probíhá řízení z vyšších vrstev plánování přes prostřední vrstvy až do nejnižší vrstvy servopohonů. Složitost tvorby plánování je tedy redukována rozkladem na množiny menších plánovacích problémů. Aby mohly být plány generovány úspěšně, vyžaduje tento model relativně ucelenou reprezentaci prostředí a příslušné hierarchie řízení. Udržování takto ucelené reprezentace v různých úrovních však v mnoha aplikacích vede na neefektivní řešení problému.

Aby bylo možné používat stavové prostory nízkých dimenzí, pracuje se s částečnými modely, které popisují jednotlivé části dynamiky systému [1]. Toto vede na množinu distribuovaných zákonů řízení, které musí být kombinovány, aby byla splněna daná úloha. Hlavním problémem těchto technik je výběr podproblémů a sestavení vhodné kompozitní strategie.

### **2.1.2 Řízení založené na chování**

Přístupy řízení založené na chování využívají distribuované reprezentace řízení tak, aby v případě výskytu nejistot poskytl reaktivitu a překonání omezení klasických technik řízení [1]. Namísto použití analyticky odvozených řídicích členů definovaných na stavových prostorech nízkých dimenzí, používá tento přístup ručně naprogramované chování, tj. empiricky odvozené zobrazení od vstupu senzoru do výstupu akčního členu, jako řídicího členu. Příkladem takových chování může být zvedání noh robotu při chůzi o pevně danou hodnotu při nárazu do překážky, nebo mnoho pevně stanovených strategií vyhnutí se překážce otáčením či couváním robotu, jakmile se objeví překážka v dosahu senzorů [2]. Reaktivní chování bylo rovněž kombinováno s naplánovaným modelem pohybu tak, aby se přidala robustnost tradičním technikám založeným na modelu. Zatímco tato kombinace zvyšuje spolehlivost dosažení globálního cíle, je opět závislá na původním plánu pohybu a tím na vnitřním modelu.

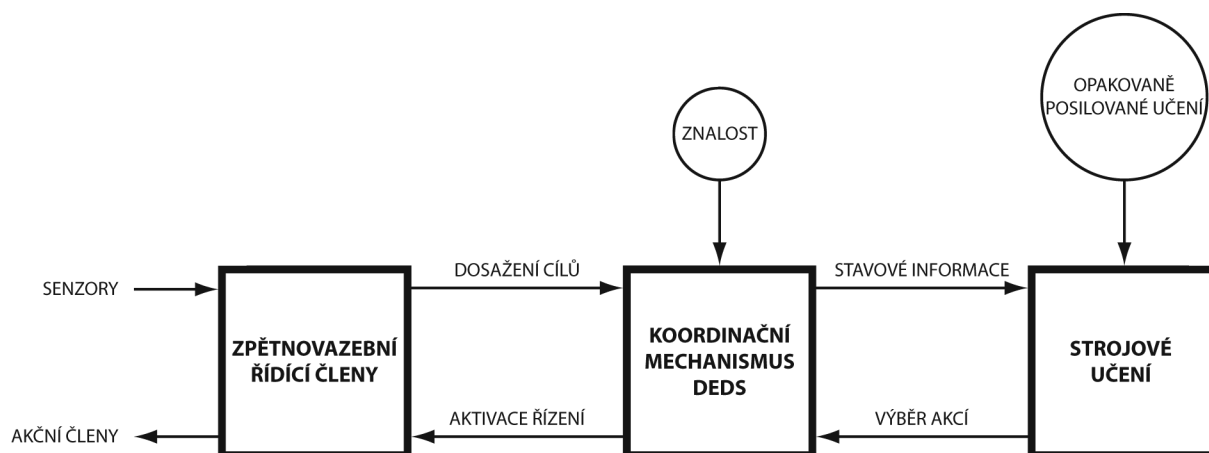
V architektuře s řadičem se pro odvození chování systému využívá řada paralelních řídicích členů uspořádaných do vrstev [1]. Konflikty mezi chováním v různých vrstvách jsou řešeny použitím mechanismu řadiče, kde vyšší vrstvy potlačují akce z nižších vrstev. To umožňuje snadno řešit komplikované úlohy, které vyžadují extrémně složité chování. Do systému ale musí být přidávány a optimalizovány nové prvky vždy, když dojde ke změně požadavků úlohy. Přidáváním velkého množství takových prvků však může vést ke komplikacím při řešení nového úkolu.

Další přístupy založené na chování, jako jsou „metody výběru akce“, mají podobné problémy. Což nakonec vedlo na použití sledu paralelních chování. Změny v požadavcích úlohy zde mohou být řešeny úpravou množiny modulů chování a jejich seřazením, než přidáním další vrstvy jako je tomu v architektuře s řadičem. Takto vytvořený systém pro složité úlohy má nicméně stále při vykonávání problémy, jelikož postrádá nástroj na analýzu a předpověď výsledného chování.

Aby bylo možné tyto problémy řešit, využívají některé přístupy více formálně odvozené řídicí členy založené na kritériích stability, které umožňují přechod mezi aktivacemi různých řídicích členů [2]. I když je dosaženo lepšího předpovídání interakce chování, tak tento přístup neposkytuje nástroj na automatické navrhování řídicích struktur zvyšujících robustnost nebo redukujících čas návrhu pro vložené řídicí úlohy. Navíc musí být ručně, pro každou kombinaci těchto řídicích prvků, optimalizován způsob, jakým tyto členy působí.

### 2.1.3 Hybridní architektura řízení

Řídicí architektura popsaná v této práci využívá hierarchického uspořádání metod řízení tak, aby bylo možné dosáhnout efektivního výkonu robotu, viz *obr. 1*.



*Obr. 1 Hybridní architektura řízení.*

V nejnižší úrovni je chování systému vytvářeno pomocí množiny zpětnovazebních řídicích členů, které obsluhují vstupy senzorů a výstupy akčních členů robotu. Pro odvození různých zákonů řízení pro malou množinu zpětnovazebních řídicích členů v kombinaci se senzory a akčními členy je použito přístupu využívajícího tzv. „báze řízení“ [1]. Pojem báze řízení bude nadále používán pro označení množiny základních řídicích členů, jejichž instance generují vzájemně nezávislá chování robotu [4]. Bázi řízení původně sestavil a ve své práci publikoval Grupen [7], který ji vytvořil pro úlohy uchopování a manipulace robotické ruky s prsty. Stejnou bázi řízení, ale s jiným mechanismem kompozice, použil později i Huber [2] pro úlohu chůze čtyřnohého robotu.

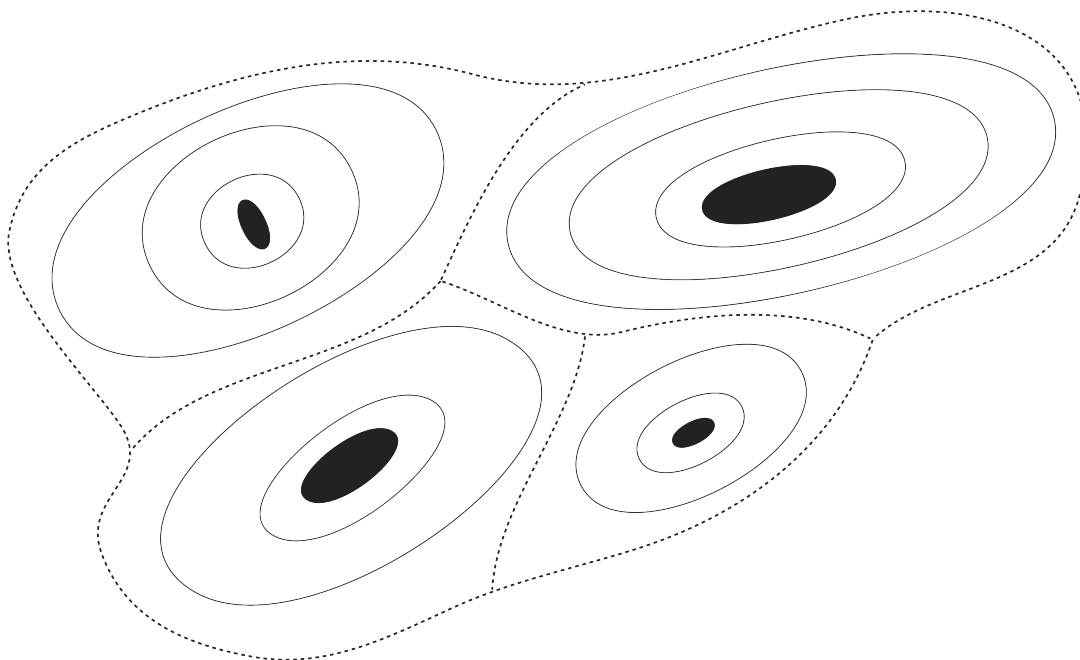
Přístup pomocí báze řízení kombinuje metody založené jak na modelu, tak na chování. Jednotlivé instance řídicích členů, tj. zákony řízení, jsou navrženy tak, aby byly stabilní a vedly ke splnění cíle širokého spektra úloh [1]. Tyto zákony řízení jsou dále schopny potlačovat náhodné poruchy okolního prostředí. Navíc slouží jako instrukční sada pro vytváření robustních strategií řízení pro složitější úlohy robotu. Strategie řízení pak mohou být určeny posloupností jednotlivých podcílů, o jejichž splnění se snaží zákony řízení.

Hlavní potenciál zpětnovazebních řídicích členů spočívá v tom, že jejich reakce zahrnují hledisko dynamiky systému robotu a jeho interakci s okolím. Proto může být chování robotu, řízeného těmito členy, reprezentováno jednodušším a více abstraktnějším způsobem. Především je lze namodelovat jako tok událostí, které odpovídají krokům konvergenčního procesu konkrétního řídicího členu [2]. Výsledkem je vyřešení problému spojitého podřízeného stavového prostoru pomocí strukturálně a časově abstraktní reprezentace, ve které je odvozen konečný stav, model diskretních událostí, pro popis všech možných chování systému [2]. Tento model tvoří základ pro koordinační mechanismus dynamického systému s diskretními událostmi (DEDS), jež tvoří druhou část hybridní architektury. Problematiku této části a poslední části architektury, strojového učení, tato práce neřeší.

## 2.2 Využití zpětnovazebních zákonů řízení pro sestavení chování

Použitím množin jednoduchých zpětnovazebních řídicích členů je možné se vyhnout mnoha problémům spojených s návrhem řízení. Strategie řízení pro dané podproblémy je zde totiž vytvořena kombinací těchto řídicích členů. Složitost tohoto přístupu tak silně závisí na vhodném výběru základních řídicích členů a mechanismu jejich kompozice [1].

V této práci je využito přístupu, který využívá formálně odvozených řídicích členů. Jsou zde použity asymptoticky stabilní a robustní zpětnovazební zákony řízení definované konfiguračními prostory, které jsou převážně nezávislé na kinematice robotu. Tato vlastnost umožňuje použití stejných zákonů řízení u různých typů robotů, čímž se redukuje potřeba návrhu dodatečného řídicího členu. Z asymptotické stability zase vyplývá, že každý zákon řízení bude používat oblast obsahující atraktor, jak ukazuje *obr. 2*.



*Obr. 2 Potenciálová plocha stabilního zpětnovazebního řídicího členu [2].*

*Obr. 2* ukazuje ekvipotenciální křivky, ohraničující potenciální plochu  $\varphi$ , zákona řízení  $\Phi$ , který je definován dvourozměrným konfiguračním prostorem. Akce



řízení, směřující k odpovídajícímu atraktoru, jsou pak určeny například metodou gradientního sestupu [8]. Atraktory jsou na obrázku znázorněny plnými plochami a spádové oblasti křivkami. Uvnitř těchto spádových oblastí může zákon řízení eliminovat omezený počet poruch a nejistot a stále přitom konvergovat k atraktoru. To činí řídicí členy lokálně robustní. Robustnost dovoluje aktivovat řízení konvergenčními událostmi nezávislými na jejich čase spuštění [2]. Výsledek zákona řízení je tím více předvídatelný.

### 2.2.1 Připojení řídicích členů

Každý prvek báze řízení,  $\{ \Phi \}$ , je stabilním a robustním zobrazením z obecného konfiguračního prostoru,  $S$ , na výstupní prostor  $A$  [2]. Pro zákon řízení  $\Phi_i$  to je zapsáno jako:

$$\Phi_i^{s_i}: S_i \rightarrow A_i, \quad a_i = f_i(s_i), \quad (1)$$

kde  $s_i \in S_i, \quad a_i \in A_i$

Řídicí členy daného robotu jsou konkretizovány připojením podmnožin možných vstupních zdrojů,  $\{ \sigma \}$ , a výstupních zdrojů,  $\{ \tau \}$ , k zákonům řízení [1]. Tyto zdroje odpovídají sensorům a abstrakcím senzoru, resp. aktuátorům a abstrakcím aktuátorů robotu [1]. Abstrakce uvnitř modelu často reprezentují zpracovaná data ze sensorů, nebo uspořádaný kinematický řetězec, kde často není vyžadováno rozlišení individuálních stupňů volnosti. Tyto zdroje jsou připojeny k zákonu řízení prostřednictvím páru zdroje a specifických transformací řízení. Vstupní transformace,  $\sigma$ , zobrazuje stav vstupních zdrojů do konfiguračního prostoru zákona řízení, zatímco výstupní transformace,  $\tau$ , převádí výstup zákona řízení na aktivace výstupních zdrojů.

$$\begin{aligned} \sigma: \sigma &\rightarrow S_i \\ \tau: A_i &\rightarrow \tau \end{aligned} \quad (2)$$

Řídicí členy vytvořené tímto připojením jsou zobrazením ze vstupních zdrojů do výstupních zdrojů. Pro dosažení cíle zákona řízení je pak možné řídit aktuátory robotu přímo informací ze senzoru.

$$\Phi_{i\tau}^{\sigma}: \sigma \rightarrow \tau, \quad \Phi_{i\tau}^{\sigma} = \tau \circ f_i \circ \sigma \quad (3)$$

Použitím tohoto procesu připojení může být pro daný robot vyčíslena množina řídicích členů,  $\{ C \}$ , z nichž každý explicitně udává přiřazení sensorů a aktuátorů jako

$$\{ C \} = \{ \Phi_{i\tau}^{\sigma_k} \} \quad (4)$$

kde  $\Phi_i$  je prvek z báze řízení,  $\sigma_k$  a  $\tau_i$  jsou podmnožiny možných vstupních a výstupních zdrojů robotu. Aby se předešlo konstrukci nekonzistentních řídicích členů, jsou povoleny pouze takové typy zdrojů, pro které během výpočtu existuje transformace do konfiguračního prostoru zákona řízení [1]. Takto může být z malé množiny zpětnovazebních zákonů řízení a kombinací s množinou sensorů a aktuátorů odvozeno velké množství řídicích členů, poskytujících robotu dostatečné možnosti pro interakci s prostředím.

### 2.2.2 Kompozice řízení

Podobně jako řídicí prvky tradičních systémů založené na chování, tak se každý řídicí zákon propojený se zdroji zabývá jednoduchým řídicím cílem, ze kterých mohou být sestaveny složitější úlohy. V mnoha případech založených na chování však může být v jednom časovém okamžiku aktivní pouze jeden řídicí prvek [2]. To snižuje efektivnost strategie řízení a nutí tak přidávat prvky chování, které se snaží zabývat kombinacemi těchto řídicích cílů. Báze řízení naopak dovoluje současnou aktivaci více řídicích prvků. Prostá kombinace řídicích členů ale může vést na mnoho případů interakcí řízení, které silně závisí na kontextu [1]. Proto se během strategie řízení musí brát v úvahu všechny tyto kontextově závislé interakce. Pokud by tak nebylo učiněno, mohou možné interakce způsobit neočekávané, chaotické chování. Přístup pomocí báze řízení proto využívá takový mechanismus kompozice, který reguluje dovolený druh řídicích interakcí. Což povoluje vytvářet simultánní řídicí členy, které přejímají vlastnosti zúčastněných řídicích členů z báze řízení.

V teorii řízení bylo použito metod tzv. nulového prostoru (nullspace) [2], které dovolují systému robotu zpracovávat současně více řídicích cílů. Současné akce lineárních řídicích členů jsou v těchto metodách skládány hierarchicky tak, že podřízené řídicí členy jsou omezeny nulovým prostorem nadřazených řídicích členů. Jinými slovy, podřízený řídicí člen může provádět pouze akce, které nebudou zasahovat do rovnováhy nadřazeného řídicího členu. Všechny akce podřízených členů jsou tedy nuceny k tomu, aby ležely výhradně na ekvipotenciálních hladinách potenciálních ploch nadřazených řídicích členů [10]. Takto složený řídicí člen získává stabilitu výchozích členů, jelikož nejsou možné žádné destruktivní interakce.

Zatímco lze vypočítat nulové prostory v uzavřeném tvaru pro lineární řídicí členy, výpočet lokálních nulových prostorů obecných řídicích členů je velmi složitý [1]. V této práci bude použit přístup hierarchického uspořádání využívající operátor „podmíněnosti“ („ $\triangleleft$ “) pro složený řídicí člen ve tvaru  $\Phi_s \triangleleft \Phi_D$ . Tento kompozitní mechanismus rozšiřuje rozsah možných akcí podřazeného řídicího členu  $\Phi_s$  za nulový prostor na všechny řídicí akce, které se pohybují po ekvipotenciální hladině nebo které aktivně snižují potenciálovou hladinu nadřazeného řídicího členu [2].

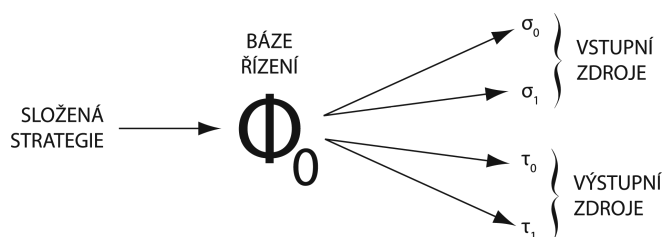
Operátor „podmíněnosti“ zajišťuje, že systém bude vždy sestupovat po potenciálové hladině řídicího členu s nejvyšší prioritou, který ještě nedosáhl svého minima [2]. Navíc tento operátor neomezuje akce nadřazeného řídicího členu a tedy nezabraňuje dosažení cíle tohoto členu.

Řešení nulového prostoru nebo operátoru „podmíněnosti“ může být generováno apriorně, neplatí to však o jejich derivacích, které mohou být výpočetně náročné [1]. Pokud je výpočet příliš náročný, může být navržené omezení lokálně aproximováno za předpokladu stálého gradientního sestupu na potenciálové hladině nadřazeného řídicího členu. Takovou aproximaci může být například lokální prohledávání s cílem nalezení akce, která bude současně snižovat potenciálovou hladinu jak nadřazeného, tak podřazeného řídicího členu. Tento proces prohledává směrem ven od nominální akce podřazeného členu k prvkům rozšířeného nulového prostoru  $e_{s,D} \in E_{s,D}$  tak, že zvyšuje hodnotu parametru  $\lambda$  z 0 na 1 a zkoumá odpovídající vektory konfiguračního prostoru,  $\vec{s}_s(\lambda) = (1-\lambda)(-\nabla \phi_s(s_{st})) + \lambda e_{s,D}$ . Proces hledání končí nalezením akce  $\vec{s}_s(\lambda)$ , která leží v rozšířeném nulovém prostoru nadřazeného řídicího členu a pro kterou je  $\vec{s}_s(\lambda)^T \nabla \phi_s(s_{st}) < 0$ . Pokud se nepodaří

najít takový vektor, rovná se příspěvek od podřízeného řídicího členu  $\vec{0}$ .

Použitím tohoto mechanismu kompozice může systém automaticky rozšiřovat množinu specifických zpětnovazebních řídicích členů,  $\{ C \}$ , vytvářením složených řídicích členů ve tvaru

$$C_m : ( \dots \triangleleft ( \Phi_{i\tau_i}^{\sigma_i} \triangleleft \Phi_{k\tau_k}^{\sigma_k} ) \dots ) \quad (5)$$



Obr. 3 Ilustrace kompozice a připojení řídicích členů.

### 2.3 Báze řízení pro úlohy chůze robotu

Výběr počátečních zákonů řízení má výrazný vliv na celkovou adaptivitu řídicího systému. Především, množina řídicích členů určuje rozsah splnitelných úloh robotu.

V robotice byl použit přístup hybridního řízení pro dekompozici obecné úlohy řízení na dvě nezávislé komponenty řízení, silovou a polohovou [2]. Pomocí těchto dvou komponent mohou být vyjádřeny řídicí členy jako simultánní kombinace řízených silových a polohových podprostorů. Stejného dekompozičního přístupu je využíváno i v této práci. Báze řízení může být sestavena např. ze dvou zpětnovazebních zákonů řízení; řídicího členu kontaktu ( $\Phi_1$ ) a postoje ( $\Phi_2$ ), které jsou schopny řešit obecné cíle řízení robotu, jak uvádí [9]. Tyto zákony řízení jsou vyjádřeny ve formě nezávislé na kinematice a geometrii robotu, což umožňuje jejich použití i pro jiné typy robotů a úlohy od robotické manipulace až po kráčivý pohyb. Jelikož se tato práce zabývá návrhem a implementací výše uvedených řídicích členů, jsou jejich detailnímu rozboru věnovány následující kapitoly shrnující současný stav této problematiky v mezinárodní literatuře.

#### 2.3.1 Řídicí člen kontaktu – $\Phi_1$

Řídicí člen kontaktu se snaží pohnout nohou, kontaktem, na základě místní geometrie prostředí s cílem minimalizovat zbytkové síly a momenty v těžišti robotu a tím dosáhnout splnění kritéria trojúhelníkové statické stability [9].

Jedním ze způsobů konstrukce řídicího členu kontaktu může být využití zákona, který použil ve své práci Grupen [11] pro úlohy uchopení předmětu robotickou rukou. Zde se řídicí člen kontaktu sestává ze dvou podčlenů, silového a momentového. Každý podčlen je založen na zjednodušeném modelu, kde kontakty jsou dokonalé bodové a síly na kontaktech mají jednotkovou velikost. Silový podčlen upravuje pozici jednotkové síly na povrch objektu, zatímco momentový podčlen minimalizuje zbytkové momenty přesouváním kontaktu po povrchu. Oba tyto podčleny jsou navrženy pomocí tzv. metriky stabilního uchopení, vyjadřující, jakého stupně bylo dosaženo nynější polohou kontaktů [11].

Tato metrika stabilního uchopení analyzuje přidruženou matici uchopení  $W$ , jež popisuje transformaci ze sil použitých kontakty na povrch objektu na souřadnicová natočení [11]. Nulový prostor této matice pak definuje bázi poruch, které je možné danou konfigurací kontaktů překonat. Stabilního uchopení je tedy možné dosáhnout vytvořením nulového prostoru uvnitř matice uchopení  $W$  [11]. To je možné pomocí neustálého ověřování podmínek, zda je pomocí daných poloh kontaktů možné stabilní uchopení. Pokud není, potom je třeba přemístit kontakty směrem ke konfiguraci kontaktů umožňující stabilní uchopení. Nicméně, jak píše Grupen, výpočet tohoto nulového prostoru není v reálném čase možný a proto navrhuje tzv. postačující metriku založenou na zbytkovém vektoru natočení  $\vec{\rho}$

$$\epsilon = \vec{\rho}^T \vec{\rho} \quad (6)$$

$$\vec{\rho} = \left( \vec{t} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \vec{\omega}_i \right)$$

kde  $\vec{t}$  vyjadřuje volitelné natočení, a zbytkový vektor natočení vyjadřuje výsledné natočení nad  $1 \leq j \leq n$  kontakty. Prvky  $t_j \in [-1, 1]$  vektoru  $\vec{t}$  a prvky  $\omega_{ij} \in [-1, 1]$  vektoru  $\vec{\omega}_i$  jsou kvalitativní ve smyslu, že neodráží technickou jednotku síly a kroutícího momentu, ale vyjadřují relativní schopnost konfigurace kontaktů přenést síly a momenty přes povrch objektu [11].

Pohybem kontaktu ve směru, který minimalizuje  $\epsilon$  řídicí člen konverguje k požadované konfiguraci stabilního uchopení. Za předpokladu, že je funkce  $\vec{\omega}_i(\theta_i)$  diferencovatelná, lze tedy vypočítat gradient  $\epsilon$  s uvažováním souřadnic kontaktu

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial \theta_i} = -\frac{2}{n} G_i^T \vec{\rho} \quad (7)$$

kde  $G_i$  je gradient uchopení s uvažováním souřadnic kontaktu  $\theta_i$  [11].

Takto navržené podčleny je možné sloučit do jednoho řídicího členu kontaktu využitím například vybrané kompozitní strategie ze znalostní báze. Výsledný gradient po kompozici pak může mít tvar

$$\nabla \epsilon = \kappa_F \cdot \frac{\partial \epsilon_F}{\partial \theta_i} + \kappa_M \cdot \frac{\partial \epsilon_M}{\partial \theta_i} \quad (8)$$

kde  $\kappa_F$  a  $\kappa_M$  jsou aktivační koeficienty silového, resp. momentového podčlenu. Tyto koeficienty mohou být vypočítány, jak uvádí Grupen, například pomocí Luceova výběrového axiomu.

Stejný přístup, ale pro řízení čtyřnohého robotu se používá i v práci [2]. Výsledný zbytkový krouticí moment  $\epsilon$  definuje Huber jako rozdíl mezi výslednými silami,  $\vec{f}$  (resp. výslednými momenty,  $\vec{m}$ ), vyplývajícími z množiny kontaktů, a referenčním krouticím momentem  $\vec{\omega}_{ref}$ , který specifikuje danou úlohu:

$$\epsilon = \sum_{i=0}^k \vec{\omega}_i - \vec{\omega}_{ref}, \quad \vec{\omega}_i = \begin{pmatrix} \vec{f}_i \\ \vec{m}_i \end{pmatrix} \quad (9)$$

Na tomto základě lze pak potenciálovou plochu zákona řízení určit jako

$$\Phi_f = \epsilon^T \epsilon \quad (10)$$

Gradientní sestupná metoda po této potenciálové ploše optimalizuje umístění kontaktu tak, aby aplikované síly na prostředí splňovaly daný úkol. Pro jisté geometrie prostředí tohoto zákona řízení bylo prokázáno, že konverguje ke globálně optimálnímu řešení [2]. Obecně ale může být z tohoto zákona odvozen řídicí člen, který konverguje k silovému nebo momentovému řešení, které je lokálně robustní s ohledem na rozsah nejistot a poruch [2].

Jelikož momenty jsou veličiny, které jsou počítány nepřímo z geometrie postavení robotu, mohou být tedy zatíženy chybou [1]. Proto Bor nabízí řešení pouze měřením reakcí v došlapech robotu. Výsledná potenciálová funkce má tvar

$$\Phi_x = \begin{cases} (F_x - F_{safe})^2, & F_x \geq F_{safe} \\ 0, & \text{jinak} \end{cases} \quad (11)$$

kde  $F_x$  je reakce v došlapu protější nohy vůči noze zdvihnuté a  $F_{safe}$  určuje minimální sílu, jakou může být tato noha zatížena. Jedná se tedy o staticky stabilní postavení robotu zvětšené o bezpečnou sílu [1].

### 2.3.2 Řídicí člen držení těla – $\Phi_2$

Řídicí člen držení těla optimalizuje postoj nohy robotu, která je v interakci s prostředím. Snaží se tedy udržet takový postoj, ve kterém má noha maximální pracovní prostor, tj. aktuátory jsou umísťovány optimálně v mezích jejich limitů [9].

V tradičním hybridním řízení není tento řídicí člen vyžadován. Je však důležitý pro kloubové mechanismy robotů, které obsahují přebytné stupně volnosti.

Základem tohoto členu je zákon řízení založený na heuristické míře postoje [12],

$$m = \prod_{i=0}^{i < 4} \left( p_i \prod_{j=0}^{j < 3} \cos(\theta_{\epsilon_{ij}}) \right) \quad (12)$$

kde  $\theta_{\epsilon_{ij}}$  je úhel kloubového spojení nohy  $i$  a kloubu  $j$ , normalizován na interval  $(-\pi, \pi)$ .

$$p_i = \det(\sqrt{J_i J_i^T}) \quad (13)$$

je index manipulovatelnosti nohy  $i$  [13], kde  $J$  je matice, na jejíž hlavní diagonále jsou umístěny složky vektoru  $\vec{m} = N - T$ ,  $N$  značí bod došlapu  $i$ -té nohy a  $T$  je poloha těžiště robotu.

Míra postoje  $m$  je tím větší, čím jsou všechny úhly noh vzdálené od svých krajních poloh. Takto je získána potenciálová plocha, která dovoluje gradientnímu sestupu robustně optimalizovat držení těla robotu.

Jiné řešení bylo zvoleno v práci [1]. Řízení je zde realizováno na základě čtyř funkcí jednotlivých noh, které ohodnocují délky a úhly koncových bodů noh od svých středních poloh [1]

$$\phi_{LEGi} = (l_i - l_{mid})^2 + (\alpha_i - \alpha_{mid})^2 \quad (14)$$

kde  $l_i$  je aktuální délka  $i$ -té nohy a  $\alpha_i$  je aktuální úhel  $i$ -té nohy.  $l_{mid}$  a  $\alpha_{mid}$  jsou střední polohy délky a úhlu nohy.

Celková potenciálová funkce je pak součtem těchto funkcí jednotlivých noh. Výsledný průběh potenciálové funkce je však komplikovaný a znesnadňuje minimalizaci pomocí gradientních metod [1].

## 2.4 Zhodnocení teoretických východisek

Na základě zadání řeší diplomová práce návrh zpětnovazebních řídicích členů, a to řídicího členu kontaktu a držení těla. Tyto členy tvoří nejnížší úroveň hybridní architektury řízení. Výhodou zpětnovazebních řídicích členů je jejich vyjádření ve formě nezávislé na kinematice a geometrii robotu, což umožňuje jejich použití i pro jiné typy robotů a různé úlohy, jak je uvedeno v kapitole 2.1.3.

Dle rešeršní studie je řídicí člen kontaktu detailně popsán v práci [11]. Jedná se však o řízení robotické ruky pro úlohy uchopování předmětů, viz kap. 2.3.1. Pro řízení čtyřnohého robotu je tento člen krátce zmíněn v práci [2]. Další řešení řídicího členu kontaktu pro čtyřnohý robot nabízí Bor [1] a to vytvořením potenciálové funkce pouze pomocí měření reakcí v došlapech robotu. V této diplomové práci byl tedy vytvořen vlastní matematický model řídicího členu kontaktu s využitím poznatků z rešerše.

Pro řešení řídicího členu držení těla byl vybrán přístup založený na maximalizaci heuristické míry postoje - manipulovatelnosti - viz kapitola 2.3.2. Byly tedy v práci rozpracovány tři způsoby dosažení této maximální míry postoje robotu bez změny poloh bodů došlapu:

1. rotace těla robotu
2. posun těla robotu v horizontální rovině
3. změnou výšky těla robotu

### 3 NÁVRH ŘÍDICÍCH ČLENŮ

V následujících kapitolách řeší autor problematiku návrhu řídicích členů dle řešeršní práce a dále implementaci vybraného řešení na matematickém modelu robotu vytvořeného v programu MATLAB.

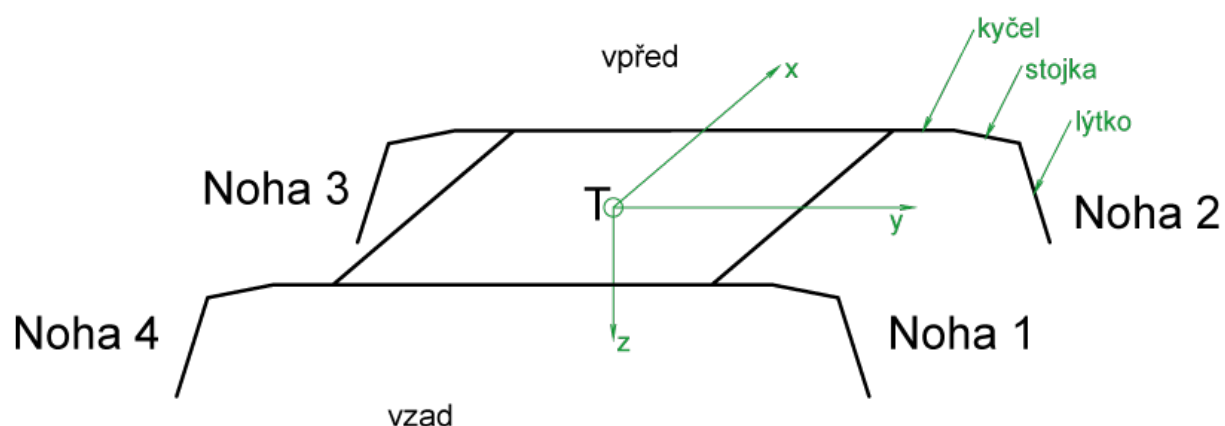
Jako referenční robot byl zvolen robot od firmy Lynxmotion typ EQ3-KT. Jedná se o čtyřnohý robot. Každá z noh má tři stupně volnosti polohované třemi servomotory.



Obr. 4 Robot firmy Lynxmotion typ EQ3-KT [14].

#### 3.1 Zavedení souřadných systémů robotu

Pro potřeby návrhu řídicích členů bylo nutné zavést několik souřadných systémů, které umožnily snazší orientaci ve výpočtech matematického modelu.

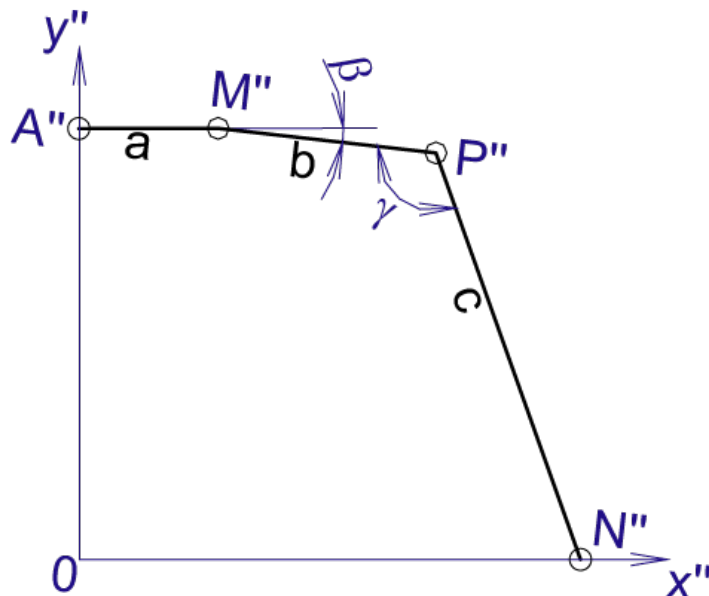


Obr. 5 Hlavní souřadnicový systém.

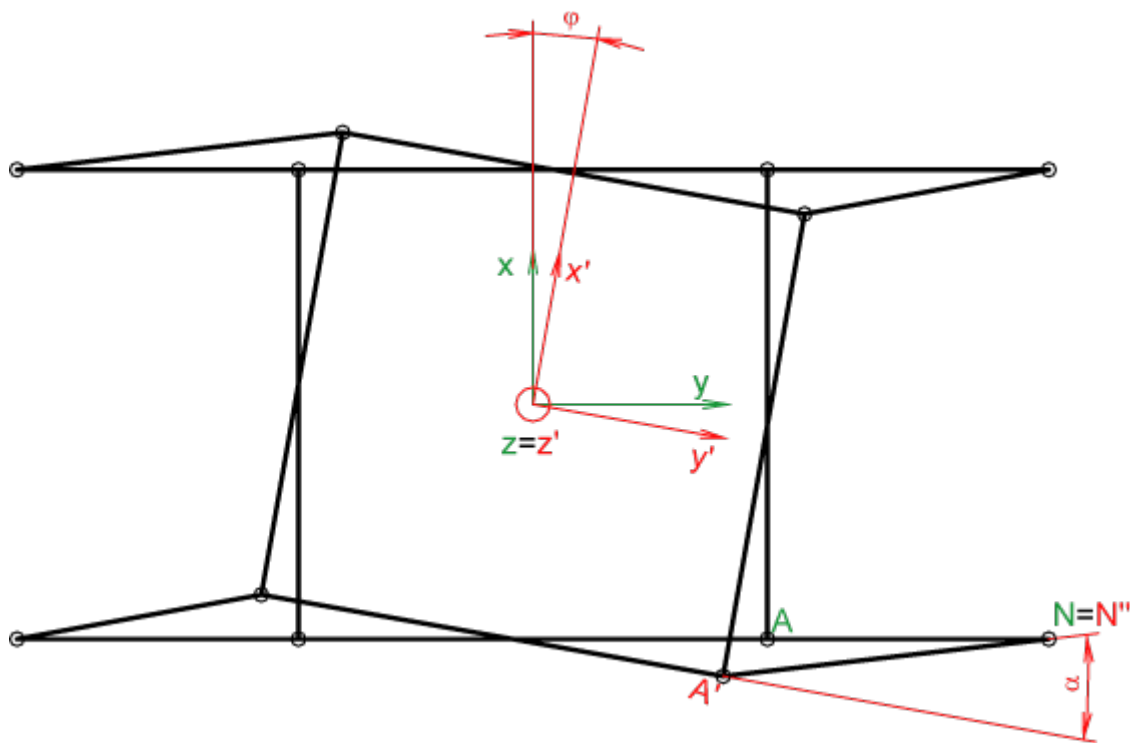
V základním, nečárkovaném, souřadném systému (dále jen SSo) je určována geometrie robotu a poloha došlapů každé nohy. Počátek tohoto souřadného systému je umístěn v těžišti těla robotu (obr. 5). Z obr. 5 je patrné i označení článků každé nohy (kyčel, stojka, lýtko) a rovněž číslování noh, pro které platí: noha č. 1 je pravá

zadní, č. 2 pravá přední, č. 3 levá přední a noha č. 4 je levá zadní.

Jednotlivé nohy mají svůj vlastní lokální, dvoučárkovaný, souřadný systém (SS2). V tomto souřadném systému jsou určovány úhly natočení  $\beta$  a  $\gamma$  každého článku nohy.



Obr. 6 Lokální souřadnicový systém nohy.



Obr. 7 Transformační souřadnicový systém.

Aby bylo možné tyto úhly počítat, je potřeba převést geometrii robotu ze souřadného systému SSo do systému SS2. Proto byl zvolen transformační,



jednočárkovaný, souřadný systém (SS1), jehož počátek se nachází v těžišti těla robotu po jeho pohybu. Tedy pro rotaci zůstává počátek SS1 shodný s počátkem SSo a pro translační pohyb je počátek SS1 posunut o velikost translace v ose  $x$ ,  $y$  a  $z$  od počátku SSo.

### 3.2 Řídicí člen kontaktu

Řídicí člen kontaktu  $\Phi_1$  minimalizuje zbytkové síly a momenty v těžišti robotu, čímž je splněno kritérium trojúhelníkové statické stability. Podle kapitoly 2.3.2 je možné jej rozdělit do dvou samostatných podčlenů, silového a momentového. Protože jsou však momenty počítány nepřímo z geometrie robotu, mohou být zatíženy chybou. Proto byla pro konstrukci tohoto řídicího členu zvolena rovnice potenciálové plochy podle (11). Výsledná potenciálová funkce má pak tvar

$$\Phi_1 = (F_x - F_{safe})^2 \quad (15)$$

#### 3.2.1 Instance řídicího členu

Minimalizovat zbytkové síly v těžišti a tedy optimalizovat rozložení sil v došlapech je možné pomocí změny bodu došlapu zvolené nohy. Tomu může odpovídat následující množina instancí:

$$\Phi_{11}^{1,2,3}, \Phi_{12}^{1,2,3}, \Phi_{13}^{1,2,3} \quad (16)$$

První instance z množiny (15) optimalizuje rozložení sil změnou došlapu nohy č. 1, druhá pak pomocí nohy č. 2 a třetí instance se snaží optimalizovat pohybem nohy č. 3. Další kombinací je pak možné odvodit zbylé instance pro čtyřnohý robot:

$$\Phi_{12}^{2,3,4}, \Phi_{13}^{2,3,4}, \Phi_{14}^{2,3,4} \quad (17)$$

$$\Phi_{13}^{3,4,1}, \Phi_{14}^{3,4,1}, \Phi_{11}^{3,4,1} \quad (18)$$

$$\Phi_{14}^{4,1,2}, \Phi_{11}^{4,1,2}, \Phi_{12}^{4,1,2} \quad (19)$$

#### 3.2.2 Matematický model

Pro konstrukci potenciálové plochy podle (15) je potřeba znát velikost reakce  $F_x$  působící v protější noze proti noze zvednuté. Tato reakce nesmí být záporná a musí být větší než zvolená bezpečnostní síla  $F_{SAFE}$ , aby se robot nedostal do staticky nestabilní polohy. Pokud bude manipulováno s nohou č. 1, pak musí být podle obr. 8 splněna podmínka

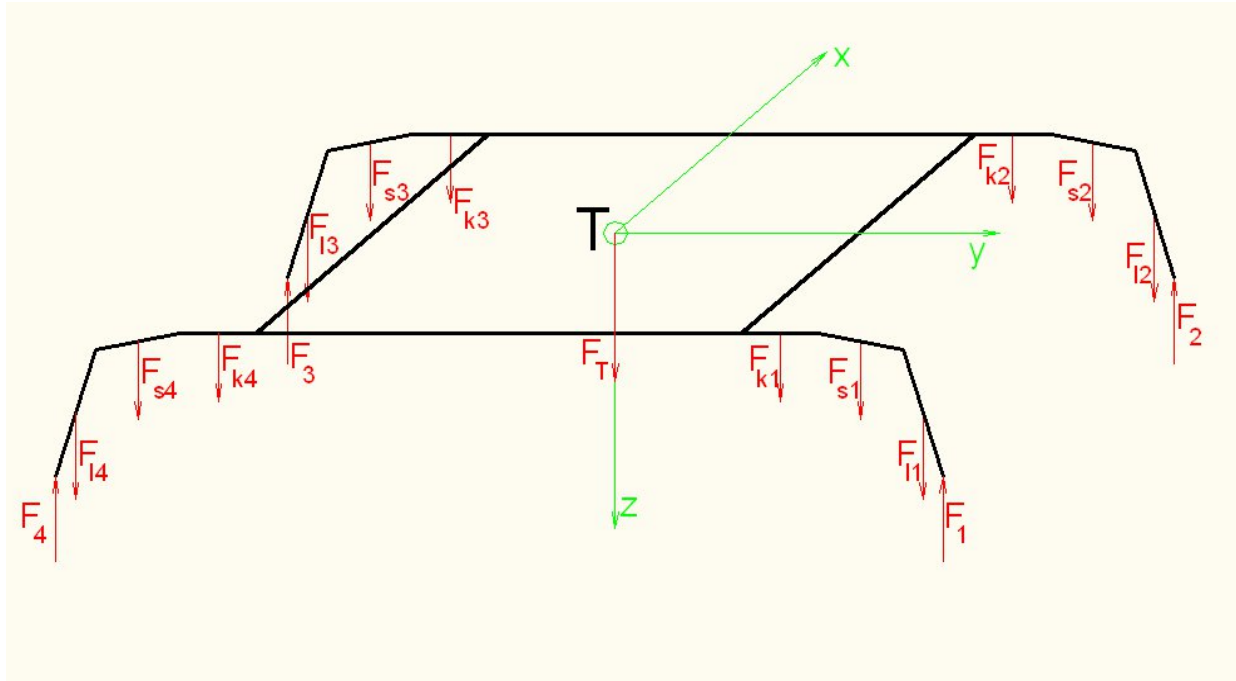
$$F_3 \geq F_{SAFE} \quad (20)$$

Je-li podmínka (20) splněna, je možné manipulovat s nohou č. 1. Dále pak pro výpočet došlapu protilehlé nohy platí

$$x_T \cdot (F_2 + F_3 + F_4) = x_2 \cdot F_2 + x_3 \cdot F_3 + x_4 \cdot F_4 \quad (21)$$

$$y_T \cdot (F_2 + F_3 + F_4) = y_2 \cdot F_2 + y_3 \cdot F_3 + y_4 \cdot F_4 \quad (22)$$

$$F_2 + F_3 + F_4 = F_G \quad (23)$$



Obr. 8 Zobrazení sil působících na robot.

odtud vyplývají výsledné rovnice (24), (25), (26), ze kterých lze vypočítat reakci v došlapu protější nohy

$$F_2 \cdot (x_T - x_2) + F_3 \cdot (x_T - x_3) + F_4 \cdot (x_T - x_4) = 0 \quad (24)$$

$$F_2 \cdot (y_T - y_2) + F_3 \cdot (y_T - y_3) + F_4 \cdot (y_T - y_4) = 0 \quad (25)$$

$$F_2 + F_3 + F_4 = F_G \quad (26)$$

kde  $F_2, F_3, F_4$  jsou reakce v došlapích jednotlivých noh a  $F_G$  je celková gravitační síla působící na robot

$$F_G = \left( \sum_{i=1}^4 F_{Tki} + F_{Tsi} + F_{Tli} \right) + F_T \quad (27)$$

kde  $F_{Tk}$  je tíhová síla kyčle,  $F_{Ts}$  je tíhová síla stojky,  $F_{Tl}$  tíhová síla lýtky a  $F_T$  je tíhová síla těla robotu. Tíhové síly vyznačené na obr. 8 působí kolmo na rovinu x-y, tedy v ose z.

Pro stanovení polohy těžiště robotu v SSo platí

$$x_T = \frac{\sum_{i=1}^4 (m_k \cdot x_{k_i} + m_s \cdot x_{s_i} + m_l \cdot x_{l_i})}{4 \cdot (m_k + m_s + m_l) + m_T} \quad (28)$$

$$y_T = \frac{\sum_{i=1}^4 (m_k \cdot y_{k_i} + m_s \cdot y_{s_i} + m_l \cdot y_{l_i})}{4 \cdot (m_k + m_s + m_l) + m_T} \quad (29)$$

kde  $m_k, m_s, m_l$  jsou hmotnosti jednotlivých článků noh (kyčle, stojky a lýtka);  $m_T$  je hmotnost těla robotu;  $x_k, x_s, x_l$  resp.  $y_k, y_s, y_l$  jsou vzdálenosti působíšť tíhových sil článků noh od těžiště robotu.

Pro stanovení výsledné hodnoty potenciálové funkce řídicího členu kontaktu podle (15)

$$\Phi_1 = (F_x - F_{safe})^2$$

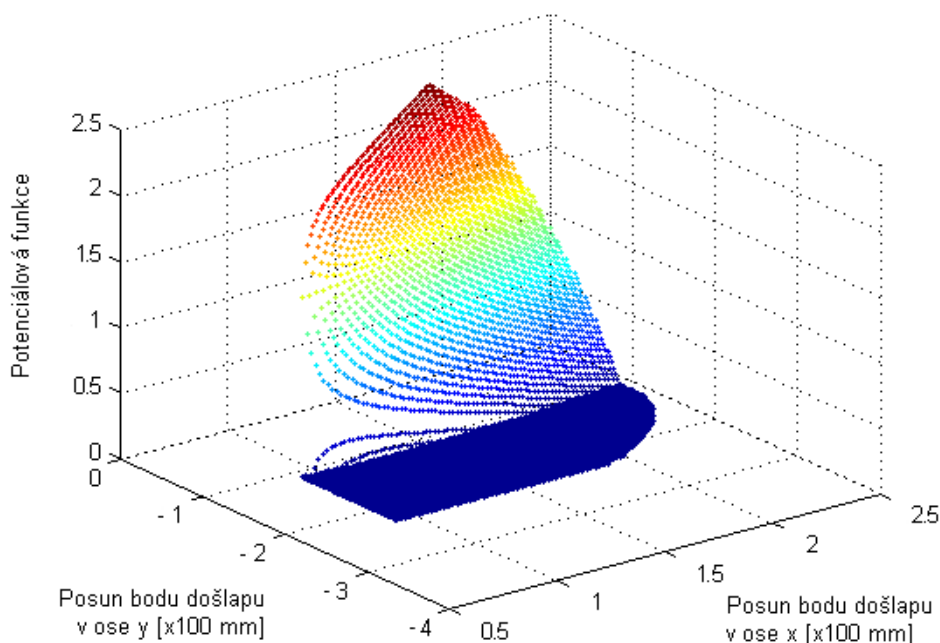
je za  $F_x$  dosazována reakce v došlapu protější nohy vůči noze zdvihnuté a  $F_{safe}$  je zvolená minimální síla, jakou může být tato noha zatížena. Bude-li zvednutou nohou noha č. 1, platí  $F_x = F_3$  a pro její výpočet lze použít rovnice 21 až 29. Aby bylo možné nohou č. 1 manipulovat, je potřeba nejdříve ověřit podmínku trojúhelníkové statické stability (20)

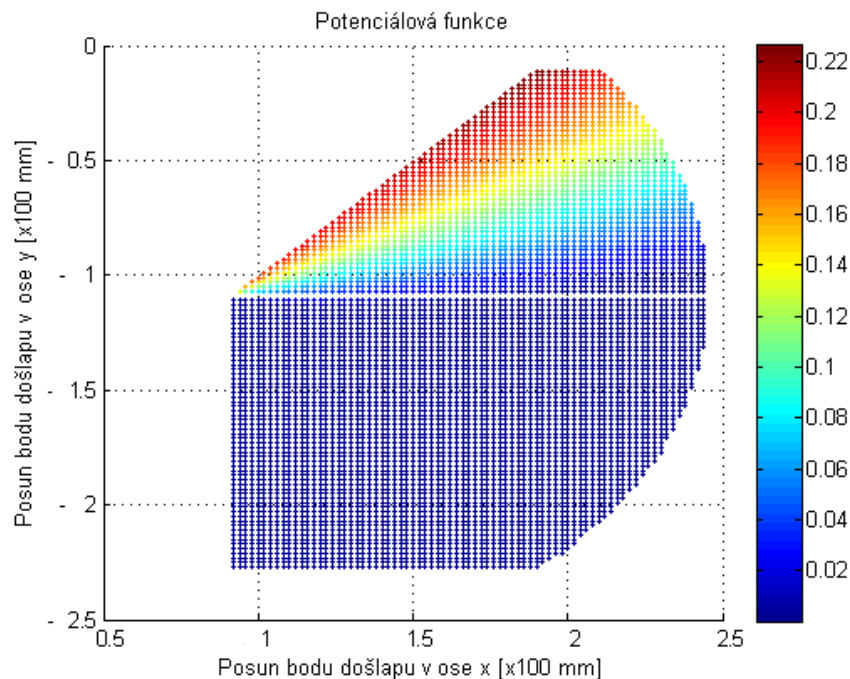
$$F_3 \geq F_{SAFE}$$

Tedy těžiště robotu musí v tomto případě ležet uvnitř trojúhelníku, jehož vrcholy tvoří body došlapu noh 2, 3 a 4.

### 3.2.3 Grafické průběhy

Následuje grafické ověření potenciálové funkce (15) řídicího členu došlapu pro různé konfigurace noh robotu podle přílohy 1.

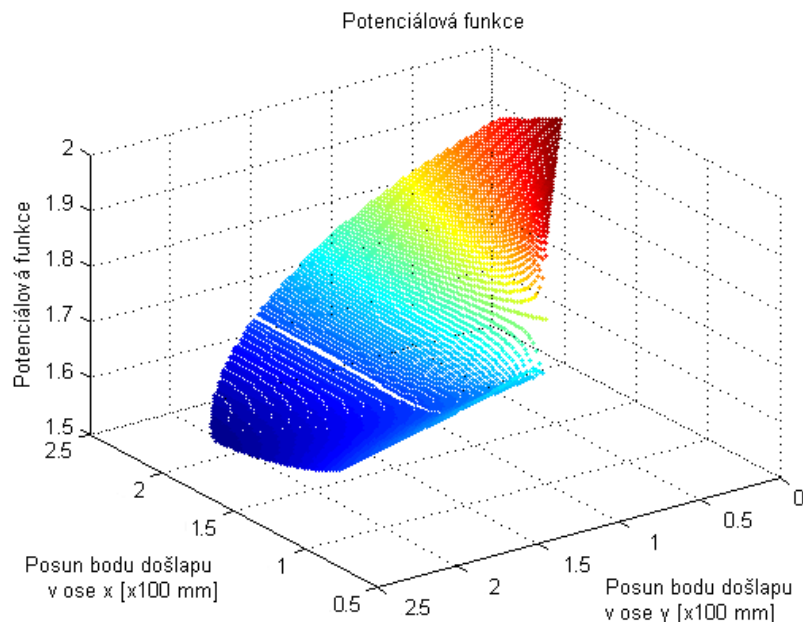


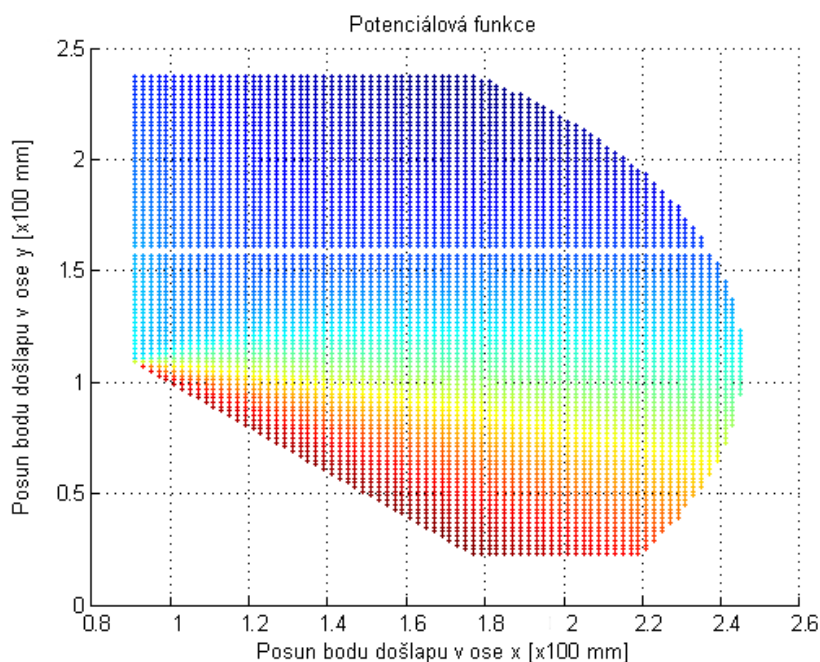


Obr. 9 Průběh potenciálové funkce řídicího členu  $\Phi_{11}^{1,2,3}$  při konfiguraci č. 1

Graf na obr. 9 zobrazuje výsledný průběh potenciálové funkce instance  $\Phi_{11}^{1,2,3}$ , při konfiguraci robotu č. 1. Řídicí člen tedy optimalizuje síly v došlapech změnou pozice došlapu nohy č. 1. Počátek souřadného systému je zde umístěn do těžiště těla robotu T.

Z grafu na Obr. 9 je patrné, že je funkce klesající a má globální minimum. Což je vhodný tvar potenciálové funkce, který umožňuje rychlou konvergenci k cíli řídicího členu. Spodní část Obr. 9 zobrazuje vlastní pracovní prostor nohy a lze zde snadno odečíst souřadnice hledaného minima funkce, a to ve vzdálenosti  $X=8$  cm,  $Y=-23$  cm od těžiště robotu. Řídicí člen se bude snažit posunout bod došlapu manipulované nohy do tohoto minima.



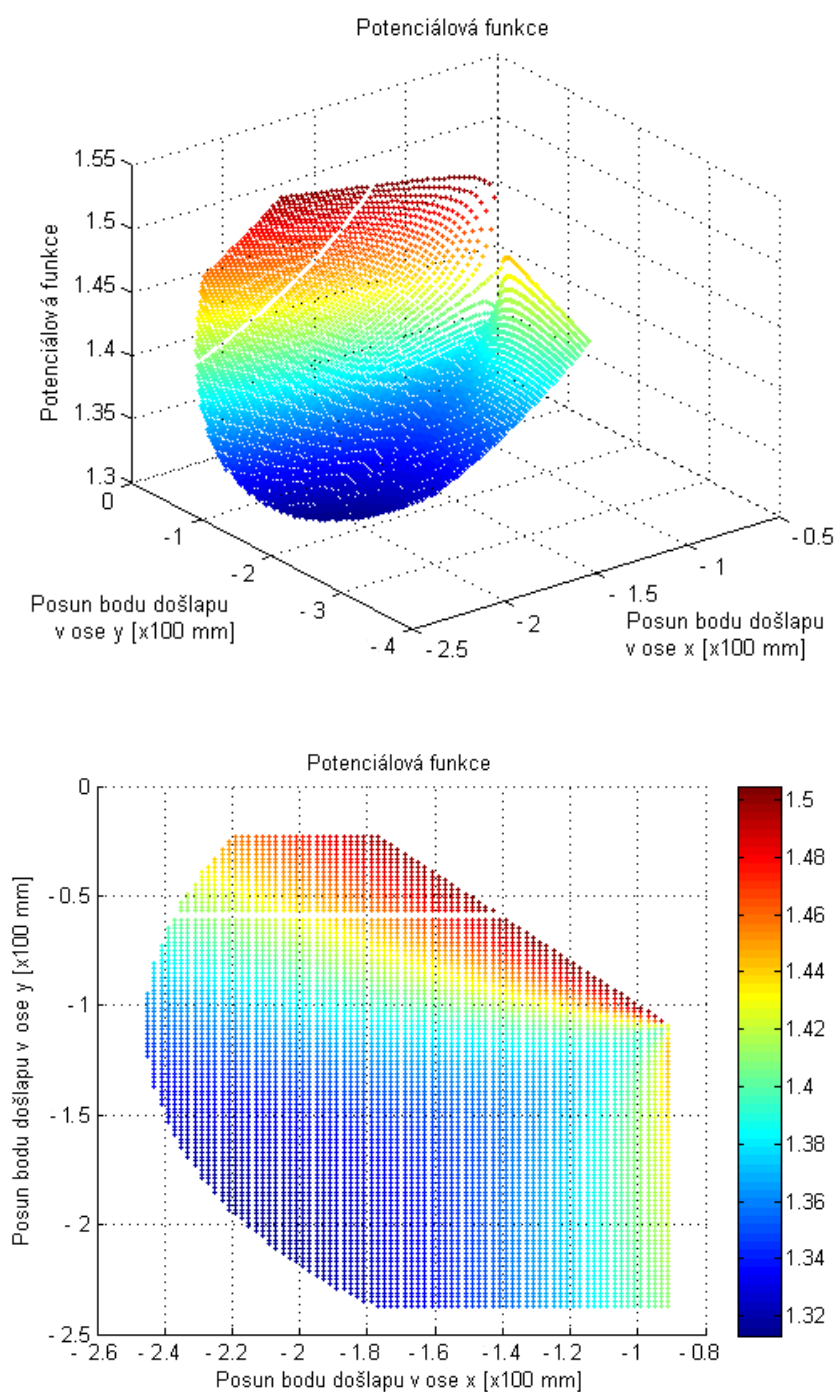


Obr. 10 Průběh potenciálové funkce řídicího členu  $\Phi_{12}^{4,1,2}$  při konfiguraci č. 2

Na obr. 10 je pak zobrazen průběh potenciálové funkce řídicího členu  $\Phi_{12}^{4,1,2}$ . Tento optimalizuje zbytkové síly pohybem nohy č. 2. Zde se snaží umístit bod došlapu ve vzdálenosti  $x=18$  cm,  $y=24$  cm od těžiště robotu.

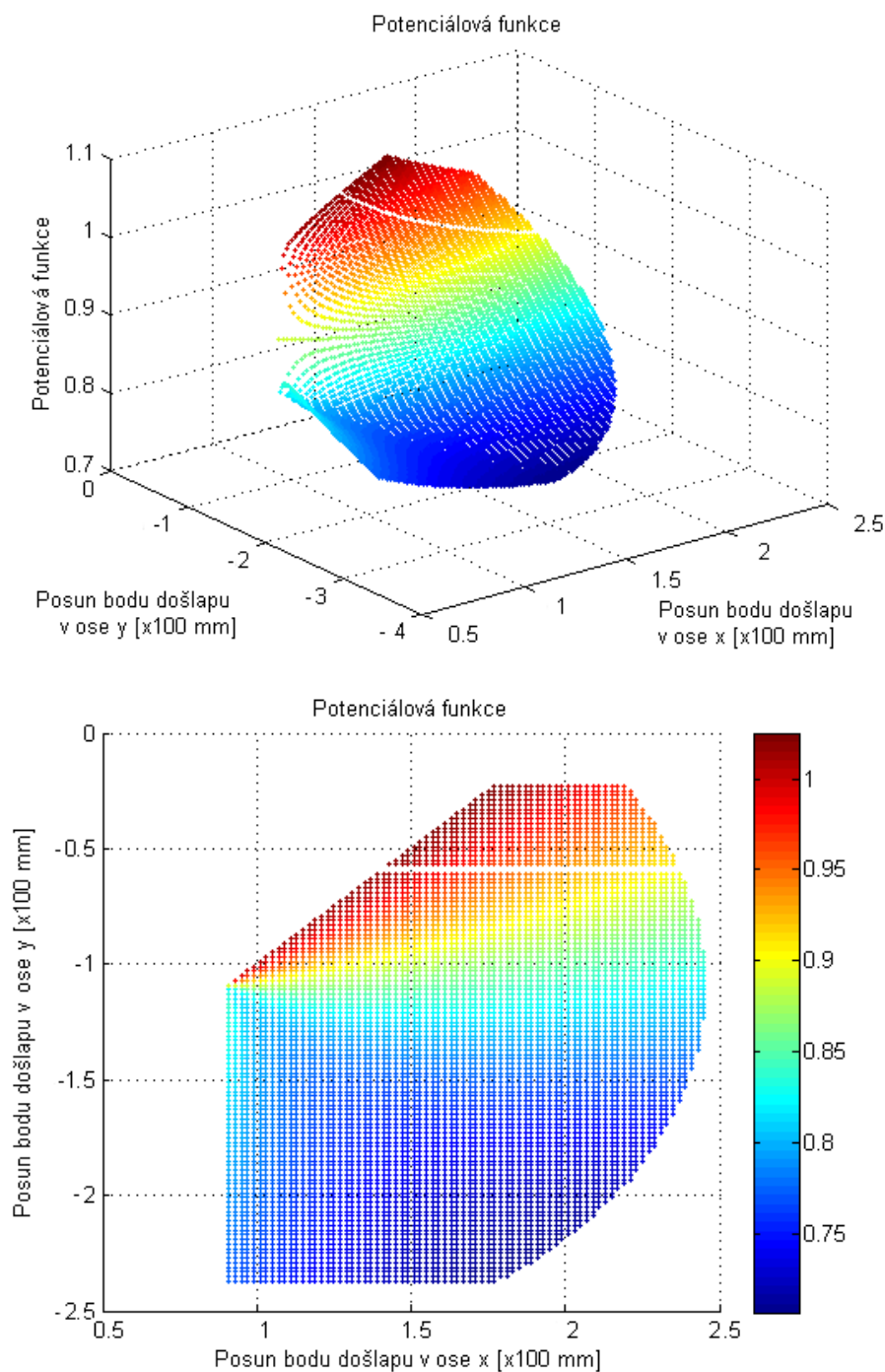
Při manipulaci s nohou robotu je nutné kontrolovat velikost reakce v protější noze podmínkou  $F_x \geq F_{SAFE}$  tak, aby nedošlo k pádu robotu. Pro konfiguraci č. 5 proto není možná instance  $\Phi_{11}^{1,2,3}$ , protože reakce v protější noze bezpečnostní podmínku nesplňuje,  $F_3 \leq F_{SAFE}$ .

Graf na Obr. 11 znázorňuje potenciálovou funkci řídicího členu pro instanci  $\Phi_{14}^{3,4,1}$  při konfiguraci robotu č. 3 (viz příloha 1). V tomto případě se snaží řídicí člen minimalizovat zbytkové síly v těžišti pomocí levé zadní nohy robotu (č. 4). Podle grafu bude toho dosaženo umístěním došlapu manipulované nohy ve vzdálenosti  $x=-22$  cm,  $y=-19$  cm od těžiště robotu.



Obr. 11 Průběh potenciálové funkce řídicího členu  $\Phi_{14}^{3,4,1}$  při konfiguraci č. 3





Obr. 12 Průběh potenciálové funkce řídicího členu  $\Phi_{11}^{1,2,3}$  při konfiguraci č. 6

Pro řídicí člen  $\Phi_{11}^{1,2,3}$  při konfiguraci nohou č. 6 (viz příloha 1) je zobrazen průběh potenciálové funkce na Obr. 12. Zde se podle grafu snaží řídicí člen umístit bod došlapu nohy č. 1 na souřadnice  $x=17$  cm,  $y=-23$  cm od těžiště.

### 3.2.4 Shrnutí

Na základě rešeršní studie bylo vybráno řešení řídicího členu podle (11). Pro výpočet potřebné reakce v protilehlé noze byl vytvořen vlastní matematický model a

výsledné řešení bylo následně graficky ověřeno. Z průběhů potenciálových funkcí vyplynul jejich vhodný klesající průběh s jedním globálním minimem. Řídicí člen tak podle potenciálové funkce může minimalizovat zbytkové síly v těžišti a tím splnit kritérium trojúhelníkové statické stability.

### 3.3 Řídicí člen držení těla

Jak bylo uvedeno v kapitole 3.2.2, řídicí člen držení těla  $\Phi_2$  se snaží udržet takový postoj robotu, ve kterém jsou úhly noh dostatečně vzdáleny od svých mezních hodnot a tím mají nohy maximální pracovní prostor při dalším pohybu robotu.

Pro konstrukci řídicího členu byl vybrán přístup založený na maximalizaci heuristické míry postoje podle (12). Výsledná potenciálová funkce řídicího členu má pak tvar podle (30)

$$\Phi_2 = \prod_{i=0}^{i<4} \left( p_i \prod_{j=0}^{j<3} \cos(\theta_{\epsilon_{ij}}) \right) \quad (30)$$

#### 3.3.1 Instance řídicího členu

Dosáhnout maximální míry postoje je možné rotací nebo posunem těla robotu, aniž by se změnila polohy bodů došlapu. Tím lze definovat několik instancí řešení v této práci.

$$\Phi_{2\varphi}^{1,2,3,4} \quad (31)$$

Instance (31) dosahuje optimální konfigurace nohou pomocí rotace těla robotu kolem osy z.

$$\Phi_{2x,y}^{1,2,3,4} \quad (32)$$

Instance (32) se snaží dosáhnout maximálního pracovního prostoru nohou robotu posunem těla robotu v rovině x-y hlavního souřadného systému SSo.

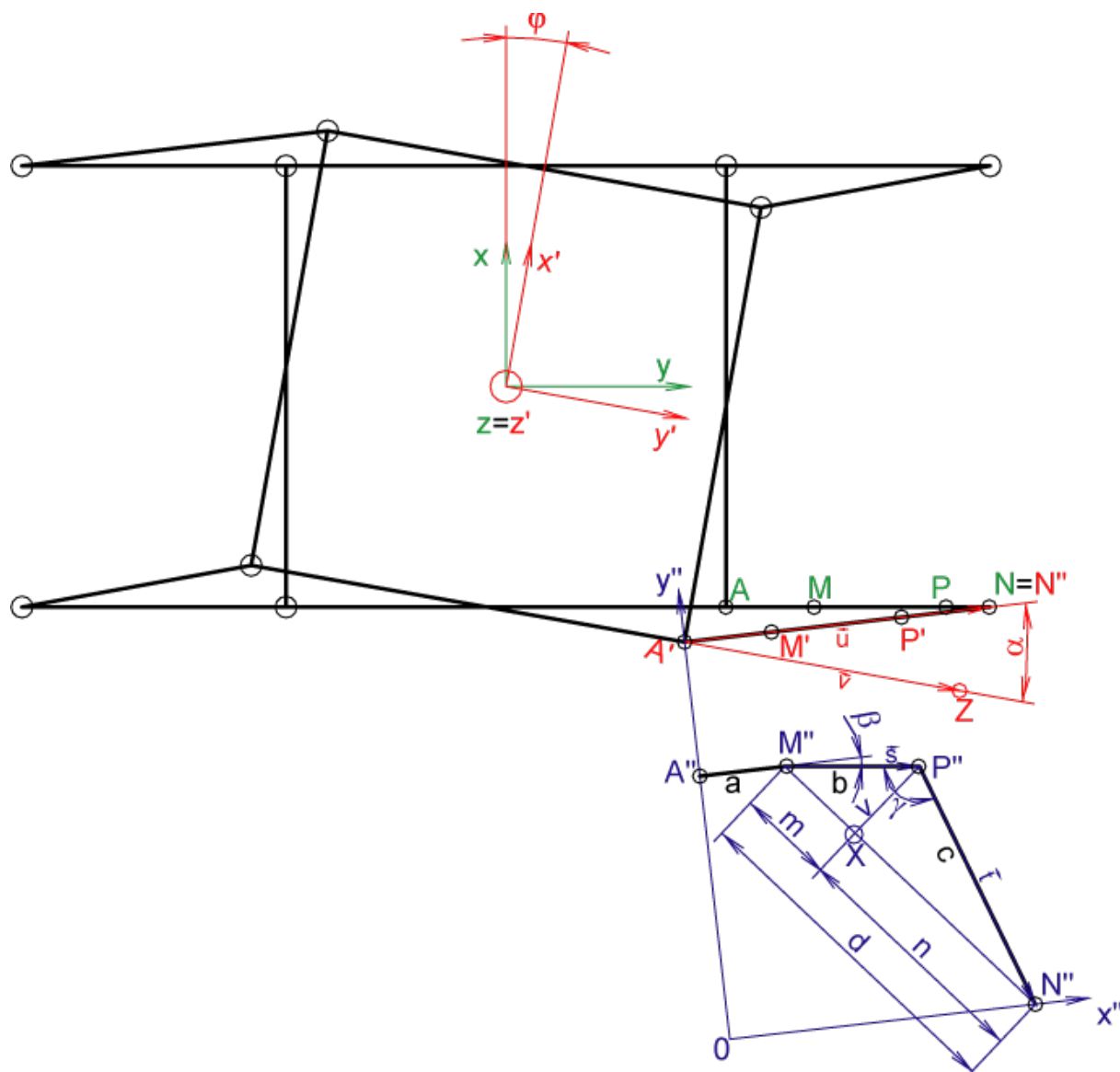
$$\Phi_{2z}^{1,2,3,4} \quad (33)$$

Poslední instance podle (33) optimalizuje konfiguraci nohou změnou výšky těla robotu, tedy posunem v ose z.

#### 3.3.2 Matematický model

Pro výpočet zvolené potenciálové funkce podle (30) a její následné grafické ověření je potřeba znát úhly kloubového spojení nohy  $i$  a kloubu  $j$ ,  $\theta_{\epsilon_{ij}}$  pro  $1 \leq i \leq 4$  a  $1 \leq j \leq 3$ . Pro potřeby návrhu řídicího členu držení těla byl proto vytvořen matematický model podle *obr. 13*. Jako vstupní hodnoty slouží geometrie robotu a velikost úhlu natočení těla  $\varphi$  v případě rotačního pohybu nebo velikost posunu v osách  $x$ ,  $y$ ,  $z$  v případě translačního pohybu. Výstupem jsou úhly noh  $\alpha$  (v rovině těla robotu, SSo),  $\beta$  a  $\gamma$  (v rovině nohy robotu, SS2).





Obr. 13 Odvození modelu pro výpočet úhlů noh robotu.

Matematický model zajišťuje mimo jiné výpočet úhlů jednotlivých noh pro takovou rotaci, resp. translaci, těla robotu, při které nedochází ke změně bodů došlapu těchto noh a tělo robotu je po celou dobu pohybu umístěno souběžně s vodorovným terénem. Protože se bod došlapu  $N$  při takovémto pohybu těla robotu nemění, je třeba nejprve provést transformaci souřadnic bodu došlapu z SSo do SS1. Pro rotaci těla robotu platí transformace

$$\begin{aligned} N_{x'} &= N_x \cdot \cos \varphi + N_y \cdot \sin \varphi \\ N_{y'} &= -N_x \cdot \sin \varphi + N_y \cdot \cos \varphi \end{aligned} \quad (34)$$

Pro posun v osách  $x$  a  $y$  je transformace

$$\begin{aligned} N_{x'} &= N_x - \delta x \\ N_{y'} &= N_y - \delta y \end{aligned} \quad (35)$$

kde  $\varphi$  je úhel natočení těla robotu,  $N_x$  resp.  $N_y$  jsou souřadnice bodu došlapu v základním souřadném systému SSo,  $N_{x'}$  resp.  $N_{y'}$  jsou souřadnice bodu došlapu v

transformovaném souřadnicovém systému SS1,  $\delta x$  resp.  $\delta y$  jsou posuvy v osách  $x$  resp.  $y$ . Při změně výšky robotu (posun v ose  $z$ ) není potřeba provádět žádnou transformaci.

Úhel  $\alpha$  pak lze vypočítat jako odchylku dvou vektorů  $\vec{u} = AN$ ,  $\vec{v} = AZ$  kde  $A$  je bod připojení nohy k tělu robotu a  $Z$  je libovolný pomocný bod, jehož souřadnice  $y$  je shodná se souřadnicí  $y$  bodu  $A$

$$\vec{v} = (v_1, v_2) = (Z_x - A_x, Z_y - A_y) \quad (36)$$

$$\vec{u} = (u_1, u_2) = (N_x - A_x, N_y - A_y) \quad (37)$$

$$\cos \alpha = \frac{u_1 \cdot v_1 + u_2 \cdot v_2}{\sqrt{u_1^2 + u_2^2} \cdot \sqrt{v_1^2 + v_2^2}} \quad (38)$$

Velikost vektoru  $\vec{u}$  určuje souřadnici  $x$  bodu došlapu v SS2 (rovina nohy)  $N_{x''}$ , potřebném pro výpočet úhlů  $\beta$  a  $\gamma$

$$|\vec{u}| = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = N_{x''} \quad (39)$$

Úhly  $\beta$  a  $\gamma$  jsou počítány v SS2, v rovině nohy. Zde je nejdříve potřebné vypočítat souřadnice kloubu, který spojuje lýtko se stojkou, tj. bod  $P$ . Jedním ze způsobů, jak jej vypočítat, je pomocí průniků dvou kružnic  $k_1(M'', b)$  a  $k_2(N'', c)$ , kde  $M''$  je bod reprezentující kloubové spojení stojky a kyčle v SS2,  $N''$  je bod došlapu v rovině nohy SS2,  $b$  je délka stojky a  $c$  je délka lýtku. Středů kružnic  $M''$  a  $N''$  jsou dvěma body trojúhelníku a hledaný průsečík  $P$  třetím. Potom jsou vzdálenosti  $d$ ,  $b$  a  $c$  délkami stran, viz obr. 6. Bod  $X$  rozdělí úsečku  $d$  na části  $m$  a  $n$

$$m + n = d \quad (40)$$

tím lze získat dva pravoúhlé trojúhelníky  $MXP$  a  $NXP$ , které mají společnou výšku  $v$ . Potom platí

$$b^2 = v^2 + m^2 \quad (41)$$

$$c^2 = v^2 + n^2 \quad (42)$$

a tedy platí rovnost

$$b^2 - c^2 = m^2 - n^2 \quad (43)$$

$$m^2 - n^2 = (m + n) \cdot (m - n) \quad (44)$$

$$(m + n) \cdot (m - n) = d \cdot (m - n) \quad (45)$$

$$b^2 - c^2 = d \cdot (m - n) \quad (46)$$

je znám i rozdíl

$$\frac{b^2 - c^2}{d} = m - n \quad (47)$$

$$n = d - m \quad (48)$$

$$m - n = 2m - d \quad (49)$$

$$\frac{b^2 - c^2}{d} = 2m - d \rightarrow m = \frac{b^2 - c^2}{2 \cdot d} + \frac{d}{2} \quad (50)$$

Nyní lze vypočítat výšku trojúhelníku v bodě  $X$

$$v = \sqrt{b^2 - m^2} \quad (51)$$

Lineární interpolací vzdáleností mezi středy vychází souřadnice bodu  $X$

$$X_{x''} = M_{x''} + \left(\frac{m}{d}\right) \cdot (N_{x''} - M_{x''}) \quad (52)$$

$$X_{y''} = M_{y''} + \left(\frac{m}{d}\right) \cdot (N_{y''} - M_{y''}) \quad (53)$$

Přičtením a odečtením úsečky  $XP$  o délce  $v$ , kolmé na spojnici středů kružnic lze získat hledané body průniků  $P$ . Z výpočtu vychází dva průniky  $P$ , osově převrácené okolo spojnice středů kružnic. V modelu je správný bod  $P$  vybírán na základě nejkratší vzdálenosti od vypočítaného bodu  $P$  v předchozí poloze robotu.

$$P_{x''} = X_{x''} \pm \left(\frac{v}{d}\right) \cdot (M_{y''} - N_{y''}) \quad (54)$$

$$P_{y''} = X_{y''} \mp \left(\frac{v}{d}\right) \cdot (M_{x''} - N_{x''}) \quad (55)$$

Úhel  $\beta$  pak vychází

$$\beta = -\arctan\left(\frac{M_{y''} - P_{y''}}{P_{x''} - M_{x''}}\right) \quad (56)$$

Poslední úhel,  $\gamma$ , lze vypočítat jako odchylku dvou vektorů  $\vec{s} = MP, \vec{t} = PN$ . Podle obr. 13 platí

$$\vec{s} = (s_1, s_2) = (P_{x'} - M_{x'}, P_{y'} - M_{y'}) \quad (57)$$

$$\vec{t} = (t_1, t_2) = (N_{x'} - P_{x'}, N_{y'} - P_{y'}) \quad (58)$$

$$\cos \gamma = \frac{s_1 \cdot t_1 + s_2 \cdot t_2}{\sqrt{s_1^2 + s_2^2} \cdot \sqrt{t_1^2 + t_2^2}} \quad (59)$$

Aby bylo zabráněno přechodu do nedosažitelných poloh noh, musí být stanoveny limity úhlů  $\alpha, \beta$  a  $\gamma$  podle reálného robotu. Na doporučení školitele jsou ještě tyto úhly normalizovány na interval  $\left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$ .

Pro stanovení výsledné hodnoty potenciálové funkce řídicího členu držení těla podle (30)

$$\Phi_2 = \prod_{i=0}^{i<4} \left( p_i \prod_{j=0}^{j<3} \cos(\theta_{\epsilon_{ij}}) \right)$$

jsou za  $\theta_{\epsilon_{ij}}$  dosazovány vypočtené úhly,  $\alpha, \beta, \gamma$  (z rovnic 38, 56, 59), což jsou úhly  $j$ -té

rotační vazby na  $i$ -té noze. Pro index manipulovatelnosti  $p$   $i$ -té nohy platí podle (13)

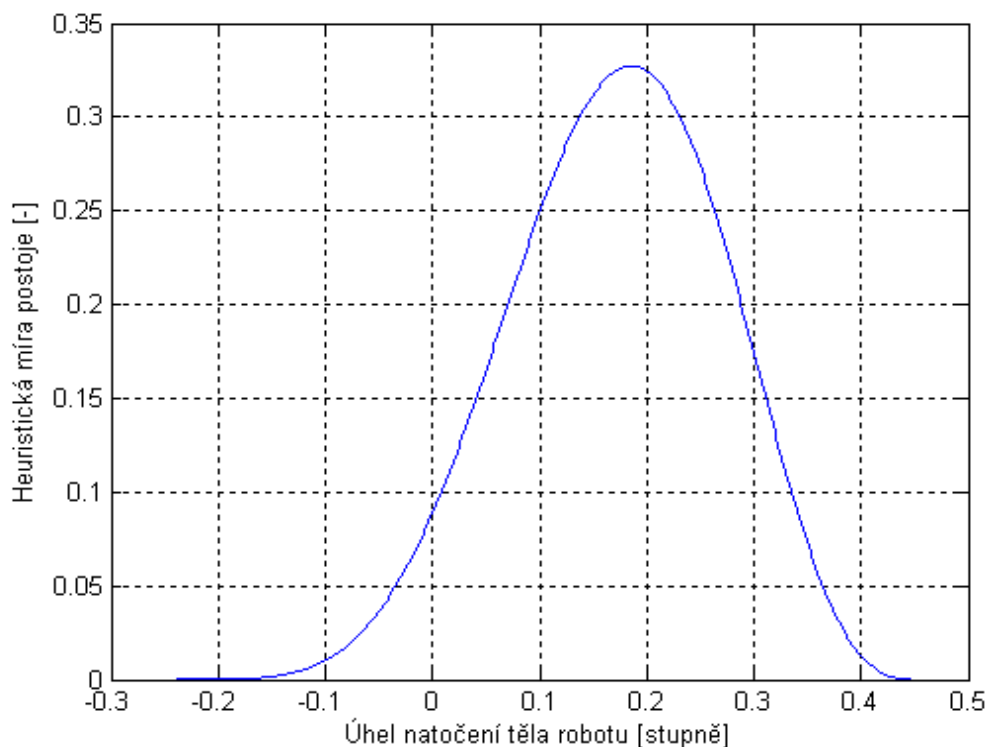
$$p_i = \det(\sqrt{J_i J_i^T})$$

kde  $\det$  je determinant,  $J$  je matice, na jejíž hlavní diagonále jsou umístěny složky vektoru  $\vec{m} = N - T$ ,  $N$  značí bod došlapu  $i$ -té nohy v SSo a  $T$  je poloha těžiště robotu. Těžiště robotu je umístěno do počátku souřadného systému SSo, tedy platí  $T = [0, 0]$ .  $J^T$  pak značí transponovanou matici  $J$ .

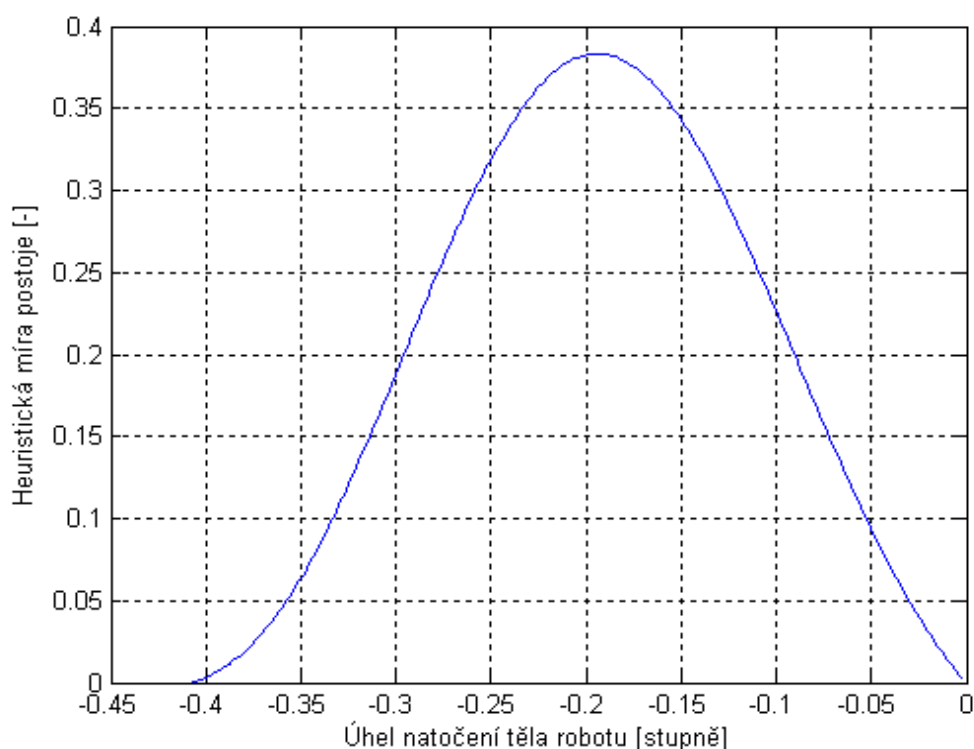
### 3.3.3 Grafické průběhy

Následují grafy heuristické míry postoje (30) pro různé konfigurace noh podle přílohy 1.

Na obr. 14 je zobrazen graf rotace těla pro instanci robotu  $\Phi_{2\varphi}^{1,2,3,4}$  při natočení všech noh o úhel  $\alpha = -45^\circ$ , tedy pro konfiguraci robotu č. 5 (viz příloha 1). Záporné hodnoty natočení v grafu značí rotaci těla robotu po směru hodinových ručiček a kladné naopak. Jak vyplývá z grafu, pro dosažení maximální heuristické míry postoje, tedy maximálního pracovního prostoru nohou, je potřeba natočení těla robotu o hodnotu přibližně 0,18 rad proti směru hodinových ručiček. Jak je také z grafu patrné, potenciálová funkce má globální maximum a tedy výhodný tvar pro maximalizaci heuristické míry postoje.



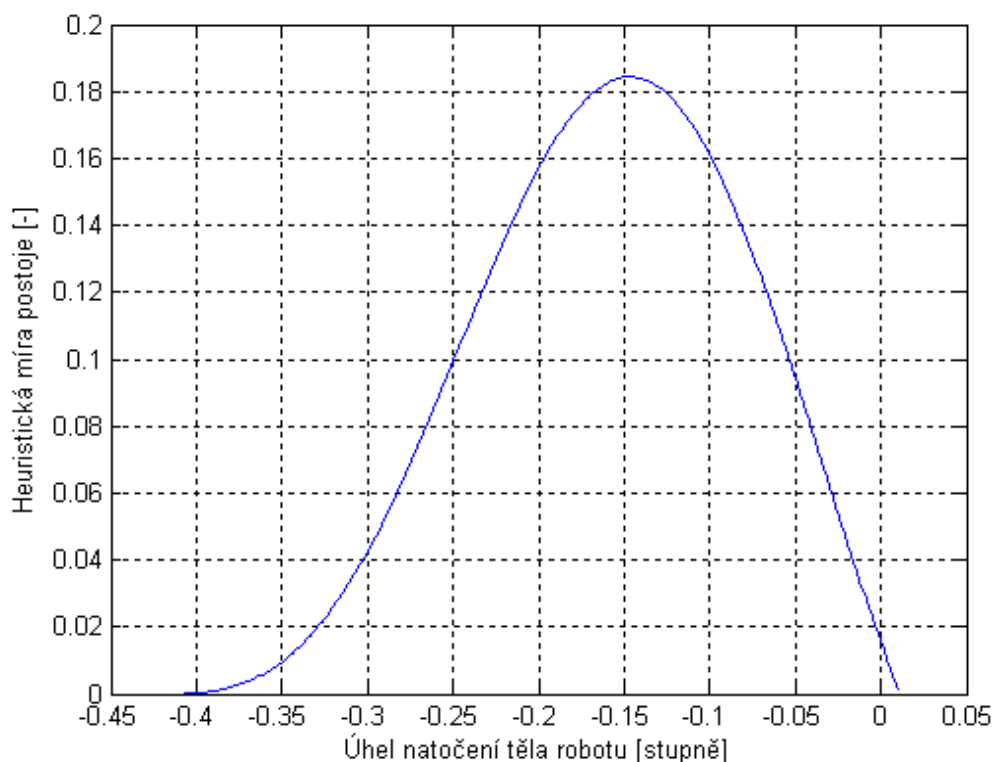
Obr. 14 Graf potenciálové funkce  $\Phi_{2\varphi}^{1,2,3,4}$  pro konfiguraci robotu č. 5



Obr. 15 Graf potenciálové funkce  $\Phi_{2\varphi}^{1,2,3,4}$  pro konfiguraci robotu č. 3.

Graf na obr. 15 ilustruje situaci při konfiguraci robotu č. 3 a instanci  $\Phi_{2\varphi}^{1,2,3,4}$ . Pravá zadní noha je natočena do své krajní polohy  $\alpha_1=90^\circ$ . Ostatní nohy jsou natočeny takto:  $\alpha_2=-30^\circ$ ,  $\alpha_3=30^\circ$ ,  $\alpha_4=30^\circ$ . Z grafu je patrné umístění počátku natáčení robotu úplně vpravo na ose natočení. Což je dáno tím, že je jedna noha ve své mezní poloze a tím je natáčení možné pouze na jednu stranu. V tomto konkrétním případě je pro dosažení maxima nutné natočení těla robotu o hodnotu asi -0,19 rad, tedy rotace po směru hodinových ručiček.

Na obr. 16 je znázorněn graf potenciálové funkce pro konfiguraci č. 4 (viz příloha 1) a instanci řídicího členu  $\Phi_{2\varphi}^{1,2,3,4}$ , kdy je úhel natočení u levé zadní nohy  $\alpha_4=45^\circ$ , což odpovídá druhé krajní poloze natočení nohy. Opět je možné natočení těla robotu pouze na jednu stranu, v tomto případě po směru hodinových ručiček o hodnotu 0,15 rad.

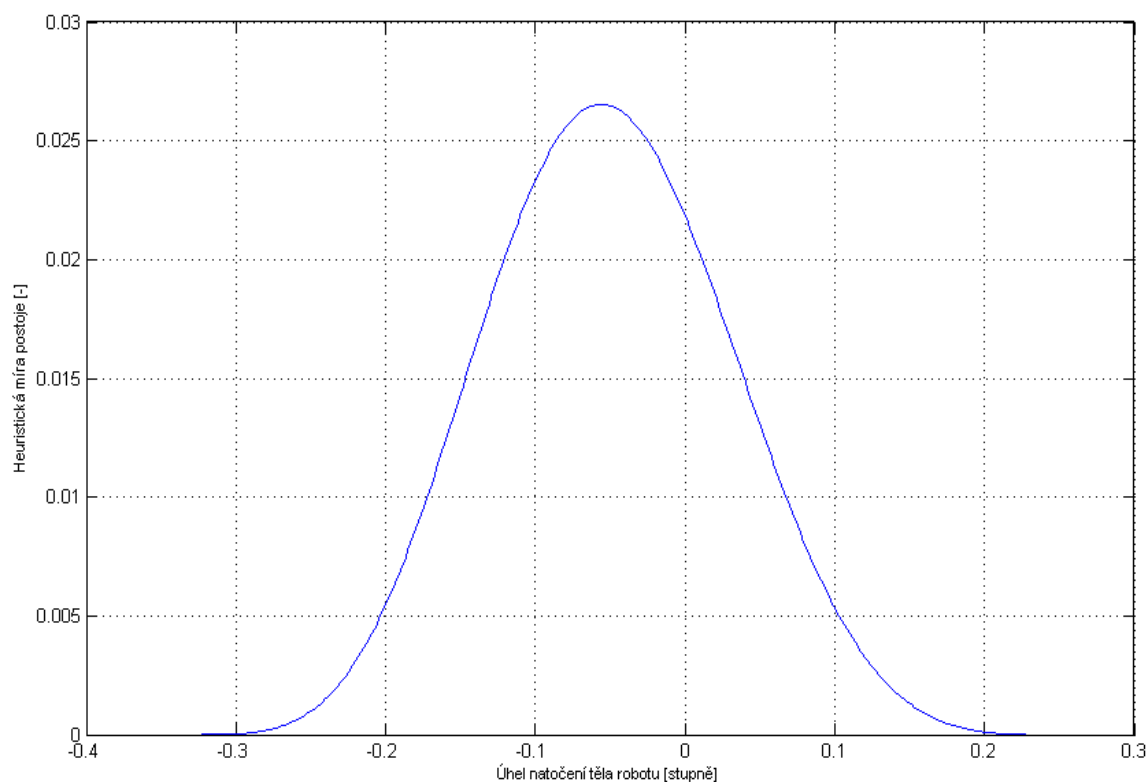


Obr. 16 Graf potenciálové  $\Phi_{2\varphi}^{1,2,3,4}$  funkce pro konfiguraci robotu č. 4.

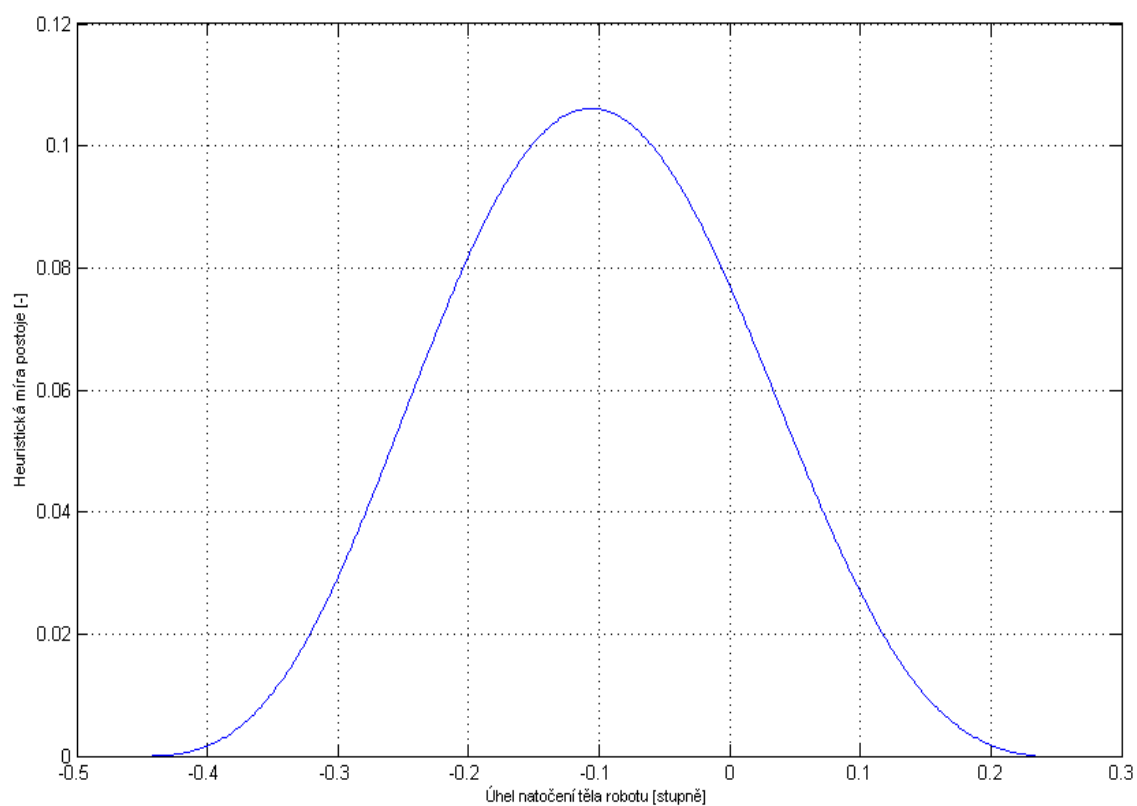
Porovnáním hodnot heuristické míry postoje z grafů na obr. 14 a obr. 15 lze zjistit, že hodnota v grafu na obr. 14 je 0,36, kdežto v grafu na obr. 15 je jen 0,185. Čím větší je heuristická míra postoje, tím jsou všechny úhly noh vzdálené od svých krajních poloh. Tedy nohy robotu po rotaci na obr. 14 budou mít větší pracovní prostor, manipulovatelnost, než po rotaci na obr. 15.

Následující grafy na obr. 17 a obr. 18 ilustrují rotaci těla robotu  $\Phi_{2\varphi}^{1,2,3,4}$  pro dosažení maximální heuristické míry postoje pro konfiguraci robotu č. 7, resp. konfiguraci č. 8 (viz příloha 1). Tyto konfigurace se od ostatních konfigurací liší nastavením úhlů  $\beta$  a  $\gamma$ , tedy jinou výškou těla robotu nad povrchem.

Výsledná hodnota heuristické míry pro konfigurace č. 7 je 0,06 a pro konfiguraci č. 8 0,12. Jak je tedy z grafů zřejmé, konfigurace č. 8 bude mít po rotaci těla robotu větší heuristickou míru postoje a tedy nohy robotu budou mít větší pracovní prostor pro další pohyby.



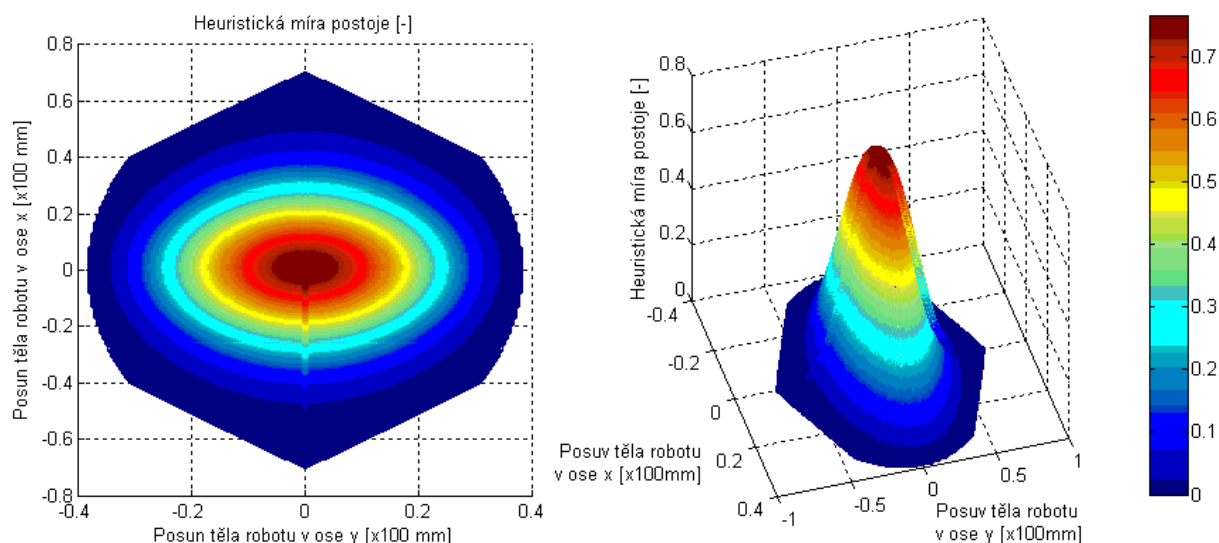
Obr. 17 Graf potenciálové funkce  $\Phi_{2\varphi}^{1,2,3,4}$  pro konfiguraci robotu č. 7.



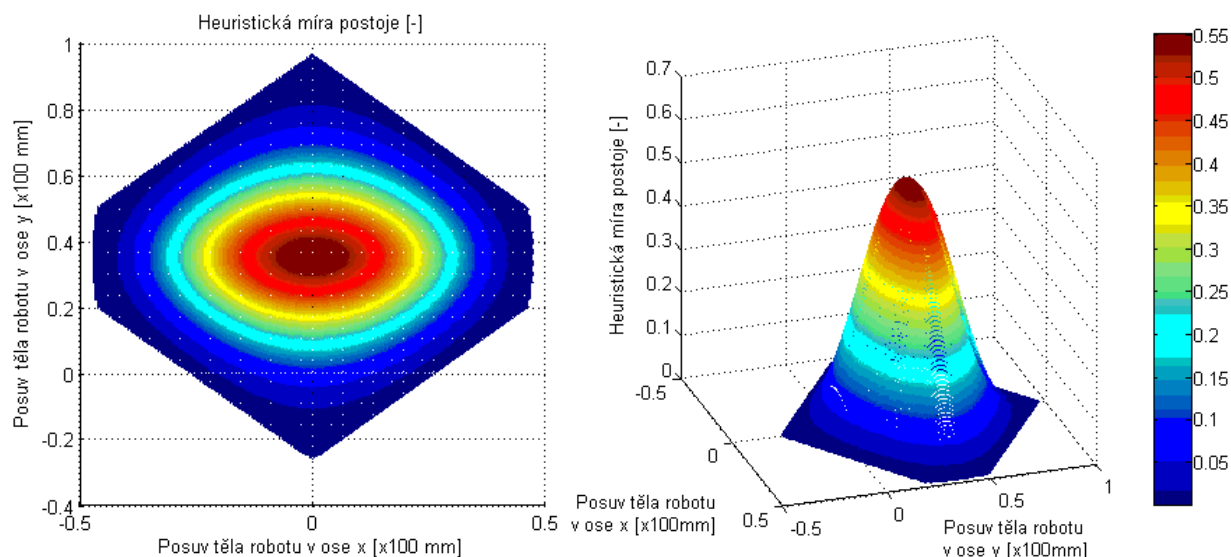
Obr. 18 Graf potenciálové funkce  $\Phi_{2\varphi}^{1,2,3,4}$  pro konfiguraci robotu č. 8.

Další možností, jak dosáhnout maximální heuristické míry postoje, je posun těla robotu v rovině x-y základního souřadného systému SSo.

Obr. 19 ukazuje stav, kdy je robot ve výchozí konfiguraci č. 1 (viz příloha 1). V tomto stavu je však maximální míra postoje pro instanci řídicího členu  $\Phi_{2x,y}^{1,2,3,4}$  již dosažena. Jak ukazují oba grafy na obr. 19, počátek translace - těžiště robotu, již má maximální hodnotu, není tedy třeba žádného posuvu těla robotu. Posunutím jakýmkoliv směrem dojde ke zhoršení heuristické míry postoje, protože se úhly noh  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$  vzdálí od svých středních hodnot.



Obr. 19 Potenciálová funkce  $\Phi_{2x,y}^{1,2,3,4}$  pro konfiguraci robotu č. 1



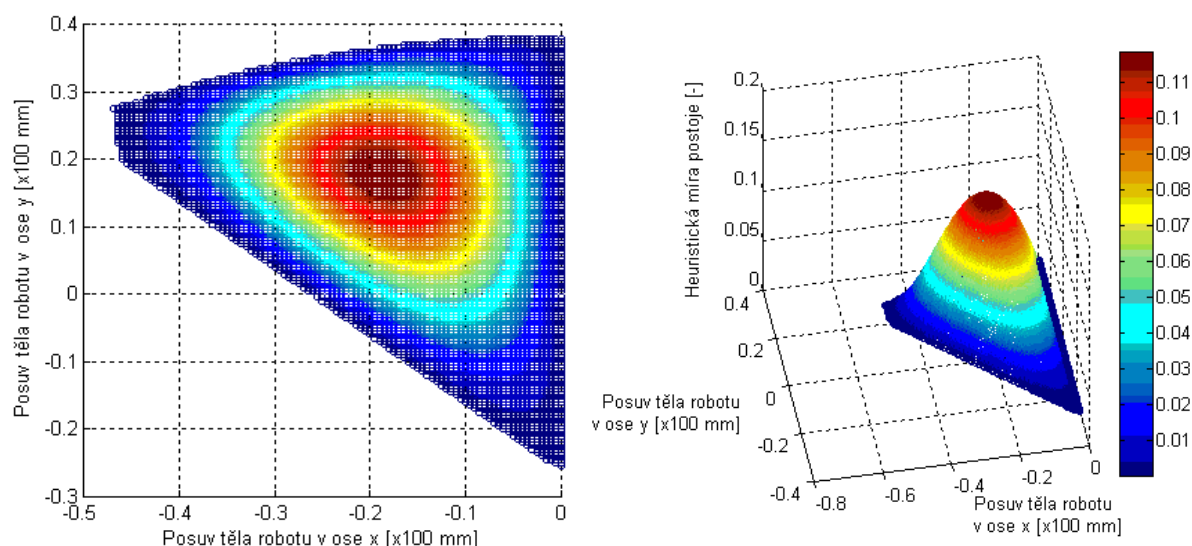
Obr. 20 Graf potenciálové funkce  $\Phi_{2x,y}^{1,2,3,4}$  pro konfiguraci robotu č. 2.

Na obr. 20 jsou vykresleny grafy heuristické míry postoje pro případ instance  $\Phi_{2x,y}^{1,2,3,4}$ , kdy je robot v konfiguraci č. 2. Těžiště těla robotu je pro tuto konfiguraci posunuto o 3 cm níže od maxima funkce v ose  $y$ . Posunutím o tuto hodnotu ve směru

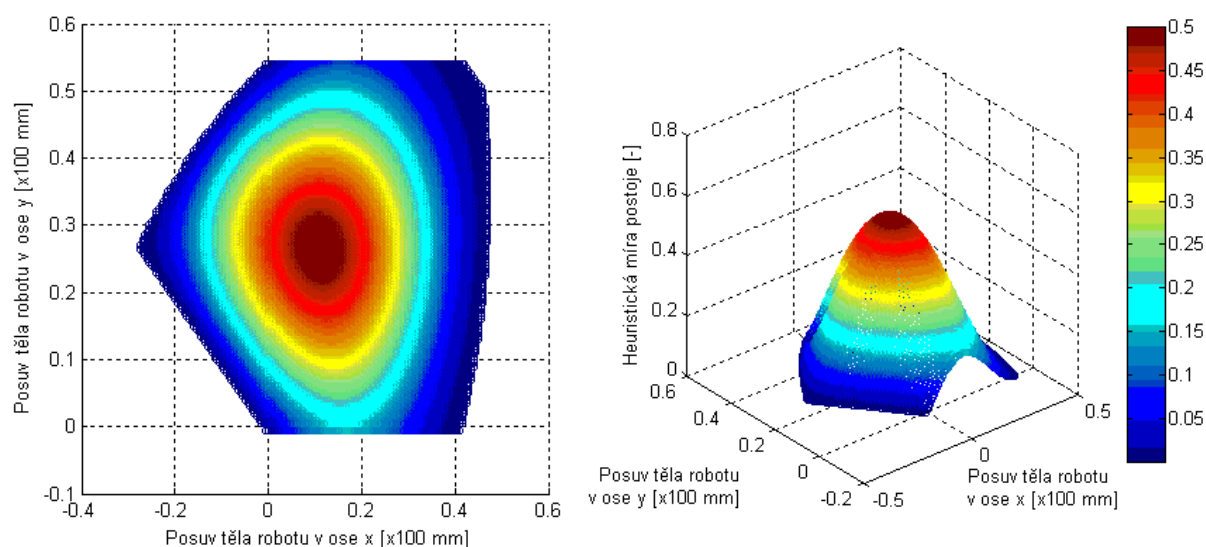


osy  $y$  bude tedy dosaženo maximální hodnoty míry postoje, Jelikož dojde k dosažení středních hodnot úhlů a nohy tak budou mít maximální pracovní prostor.

Následující grafy na *obr. 21* a *obr. 22* ilustrují opět případy mezních natočení jedné nohy. Pro *obr. 21* platí konfigurace robotu č. 3 a pro *obr. 22* konfigurace č. 4 (viz příloha 1). Tato vychýlení noh na mezní hodnoty zamezí posuvu těla na *obr. 21* v kladném směru osy  $x$  a na *obr. 22* v záporném směru osy  $y$ . Pro dosažení maximální hodnoty míry postoje je v obou případech zapotřebí posunout tělem jak v ose  $x$ , tak v ose  $y$ .



*Obr. 21* Graf potenciálové funkce  $\Phi_{2x,y}^{1,2,3,4}$  pro konfiguraci robotu č. 3.



*Obr. 22* Graf potenciálové funkce  $\Phi_{2x,y}^{1,2,3,4}$  pro konfiguraci robotu č. 4.

Nyní lze opět porovnat hodnoty heuristické míry postoje pro oba mezní případy. Větší hodnota je tentokrát v grafu na *obr. 21* a to 0,5. V grafu na *obr. 22* je tato hodnota pouze 0,12.

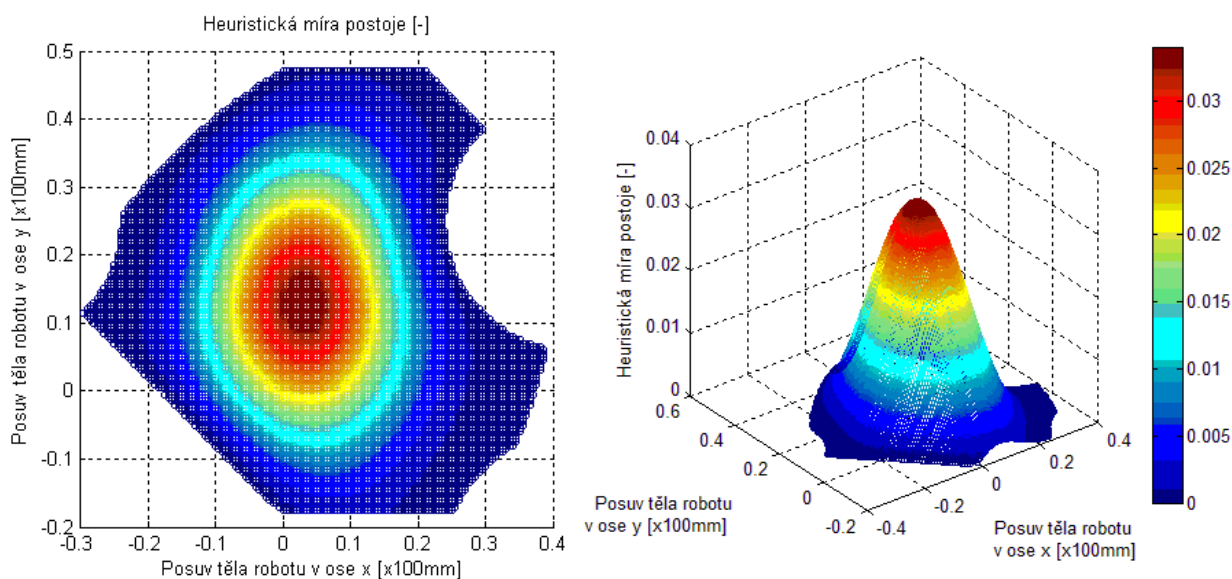
Do tabulky *tab. 1* byly pro srovnání zaneseny hodnoty těchto heuristických měr pro oba mezní případy a to jak pro instanci  $\Phi_{2\varphi}^{1,2,3,4}$ , tak pro instanci  $\Phi_{2x,y}^{1,2,3,4}$ .

tab. 1: Srovnání dosažených hodnot heuristické míry postoje pro konfiguraci robotu č. 3 a konfiguraci č. 4.

	konfigurace robotu č. 3	konfigurace robotu č. 4
$\Phi_{2\varphi}^{1,2,3,4}$	<b>0,36</b>	0,185
$\Phi_{2x,y}^{1,2,3,4}$	0,12	<b>0,5</b>

Z tab. 1 je patrné, že pro případ, kdy mezní úhel  $\alpha_i=90^\circ$  (konfigurace robotu č. 3) je pro dosažení vyšší hodnoty heuristické míry postoje lepší použít instanci  $\Phi_{2\varphi}^{1,2,3,4}$ , tedy rotaci těla robotu. Zatímco pro případ mezního úhlu  $\alpha_4=45^\circ$  (konfigurace robotu č. 4) je lepší instance  $\Phi_{2x,y}^{1,2,3,4}$ , translace těla robotu v rovině x-y.

Grafy na obr. 23 a obr. 24 zobrazují heuristické míry postoje robotu pro konfigurace č. 7 a č. 8 (viz příloha 1). Jak již bylo zmíněno, jedná se o konfigurace s různou výškou těla robotu nad vodorovným povrchem.

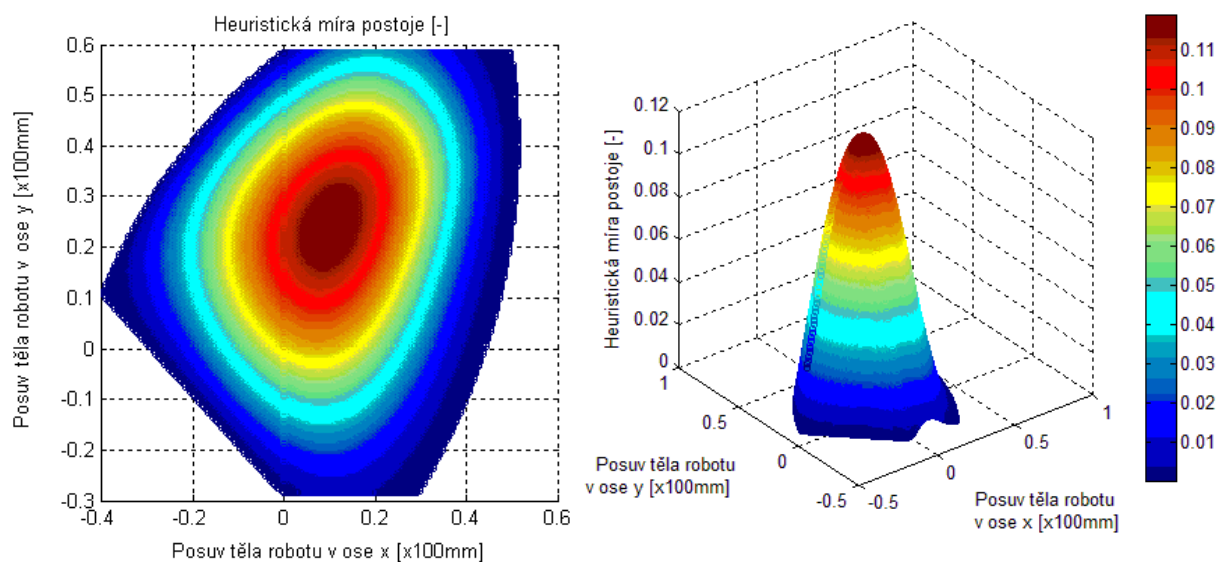


Obr. 23 Graf potenciálové funkce  $\Phi_{2x,y}^{1,2,3,4}$  pro konfiguraci robotu č. 7.

Do tabulky 2 byly opět zaneseny pro porovnání hodnoty heuristické míry pro obě konfigurace jak při rotaci - instance  $\Phi_{2\varphi}^{1,2,3,4}$ , tak translaci těla robotu - instance  $\Phi_{2x,y}^{1,2,3,4}$ . Z tab. 2 je patrné, že heuristické míry pro konfigurace 7 a 8 jsou pro obě instance téměř shodné.

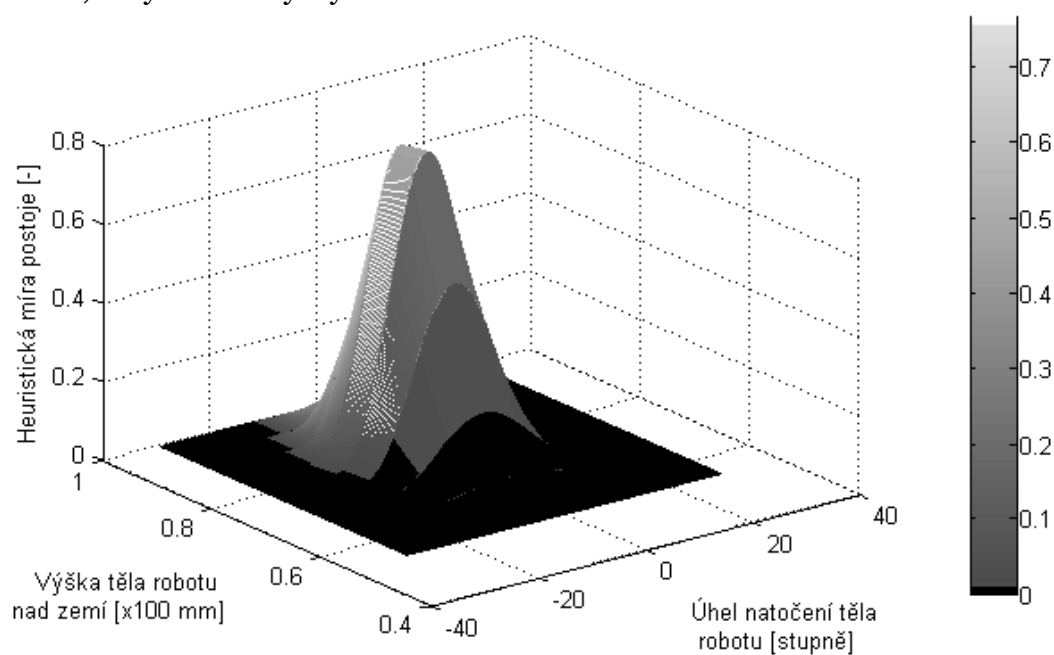
tab. 2: Srovnání hodnot heuristické míry postoje pro konfiguraci robotu č. 7 a konfiguraci robotu č. 8.

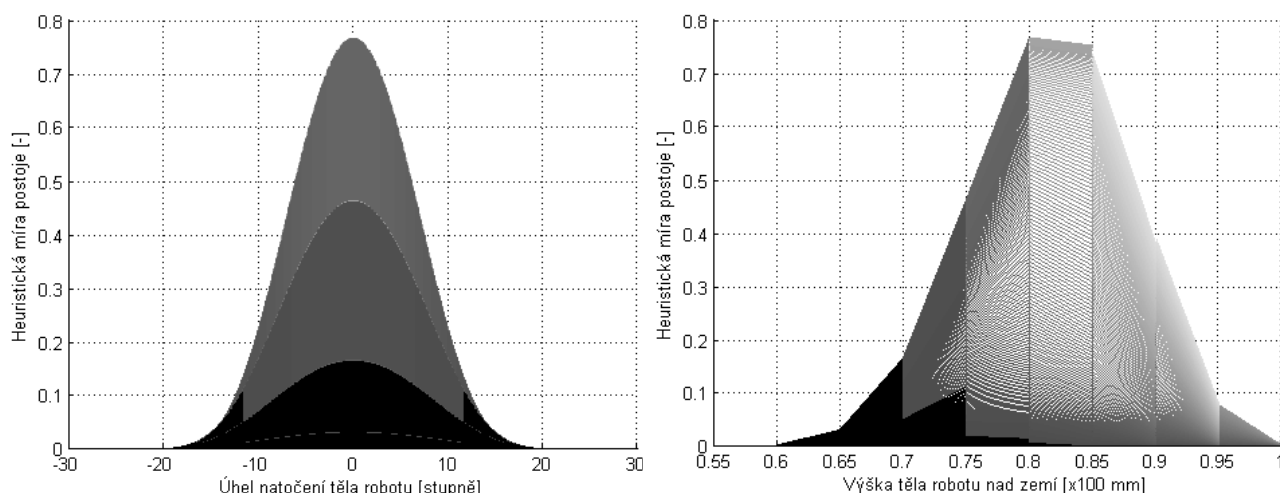
	konfigurace robotu č. 7	konfigurace robotu č. 8
$\Phi_{2\varphi}^{1,2,3,4}$	0,027	0,11
$\Phi_{2x,y}^{1,2,3,4}$	<b>0,03</b>	<b>0,12</b>



Obr. 24 Graf potenciálové funkce  $\Phi_{2x,y}^{1,2,3,4}$  pro konfiguraci robotu č. 8.

Třetí možností, jak dosáhnout maximální heuristické míry postoje, je posuv v ose z v SSo, tedy změna výšky robotu.





Obr. 25 Graf potenciálové funkce  $\Phi_{2z}^{1,2,3,4}$  pro různé výšky robotu.

Na obr. 25 je zobrazen graf pro základní konfiguraci robotu č. 1 (viz příloha 1) a různé výšky robotu při instanci řídicího členu  $\Phi_{2z}^{1,2,3,4}$ . Z grafu je patrné, že do určité výšky (zde 8 cm) hodnota heuristické míry postoje roste. Dalším zvyšováním výšky již tato hodnota klesá.

### 3.3.4 Shrnutí

Podle rešeršní studie byl zvolen pro konstrukci řídicího členu přístup založený na maximalizaci heuristické míry postoje, viz rovnice (12), (30). Byly navrženy tři způsoby, pomocí kterých je možné dosáhnout maxima této míry: rotace těla robotu kolem osy z (instance řídicího členu  $\Phi_{2\varphi}^{1,2,3,4}$ ), posuv v rovině x-y (instance  $\Phi_{2x,y}^{1,2,3,4}$ ) a posuv v ose z (instance  $\Phi_{2z}^{1,2,3,4}$ ). Tyto tři způsoby byly dále implementovány na matematickém modelu robotu vytvořeném v programu MATLAB a testovány pro různé konfigurace robotu.

Porovnáváním výsledných hodnot heuristické míry postoje (viz tab. 1 a tab. 2) pro uvedené dva způsoby dosažení maximální heuristické míry pro jednu konfiguraci robotu bylo zjištěno, že se mohou maximální hodnoty značně lišit. Například pro konfiguraci robotu č. 4 bylo dosaženo rotací těla robotu hodnoty 0,18, zatímco posunem v rovině x-y bylo dosaženo hodnoty heuristické míry 0,5. Z čehož vyplývá, že v tomto případě budou mít nohy robotu větší pracovní prostor pro další pohyb použitím druhého navrženého způsobu dosažení maximální hodnoty, tedy posunem těla robotu v rovině x-y.

## 3.4 Složený řídicí člen

Současnou aktivací více řídicích členů je možné dosáhnout složitějšího chování. Tyto aktivace jsou řízeny kompozitní strategií, přičemž je zabráněno takovým aktivacím řídicích členů, které vedou k nestabilním konfiguracím robotu.

### 3.4.1 Instance složeného řídicího členu

Aktivace vybraných řídicích členů může být prováděna asynchronně, operátor

";". Při této aktivaci jsou řídicí členy spuštěny paralelně. Další možností je hierarchické složení řídicího členu. Zde je pro popis použit operátor "podmíněnosti", („ $\triangleleft$ “), který zajišťuje, aby podřízený řídicí člen prováděl pouze akce, které nebudou omezovat dosažení cíle nadřízeného řídicího členu. Toho je dosahováno pomocí tzv. nulového prostoru (např.  $\Phi_{i\tau_j}^{\sigma_j} \triangleleft \Phi_{k\tau_l}^{\sigma_l}$  znamená, že instance  $\Phi_{i\tau_j}^{\sigma_j}$  je simultánně podmíněna instancí  $\Phi_{k\tau_l}^{\sigma_l}$ , tedy podřízený řídicí člen  $i$  pracuje v nulovém prostoru nadřízeného řídicího členu  $k$ ). Akce jsou tedy u tohoto popisu skládány hierarchicky tak, že všechny akce podřízených řídicích členů leží na ekvipotenciálních hladinách potenciálových funkcí nadřízených řídicích členů.

Příkladem složeného řídicího členu může být člen podle (60), jehož algoritmus bude popsán v následující kapitole 3.4.2.

$$(\Phi_{14}^{3,4,1} \triangleleft \Phi_{14}^{2,3,4}) \quad (60)$$

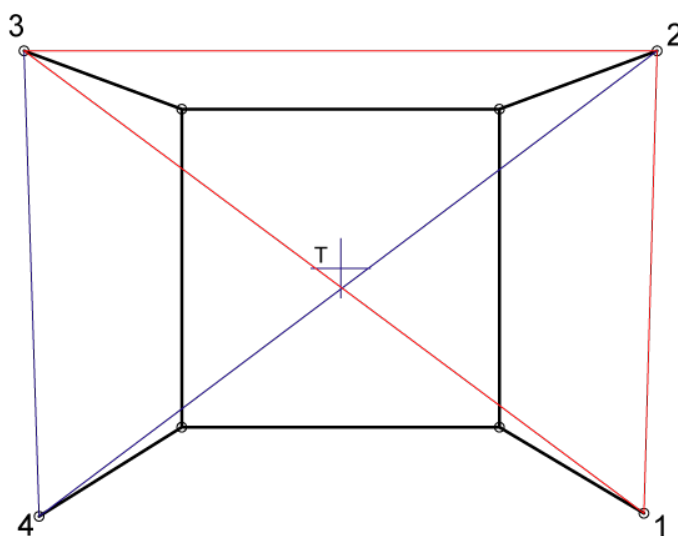
Paralelně s tímto složeným řídicím členem může ještě probíhat optimalizace postoje robotu natáčením těla (61).

$$(\Phi_{14}^{3,4,1} \triangleleft \Phi_{14}^{2,3,4}); \Phi_{2\varphi}^{1,2,3,4} \quad (61)$$

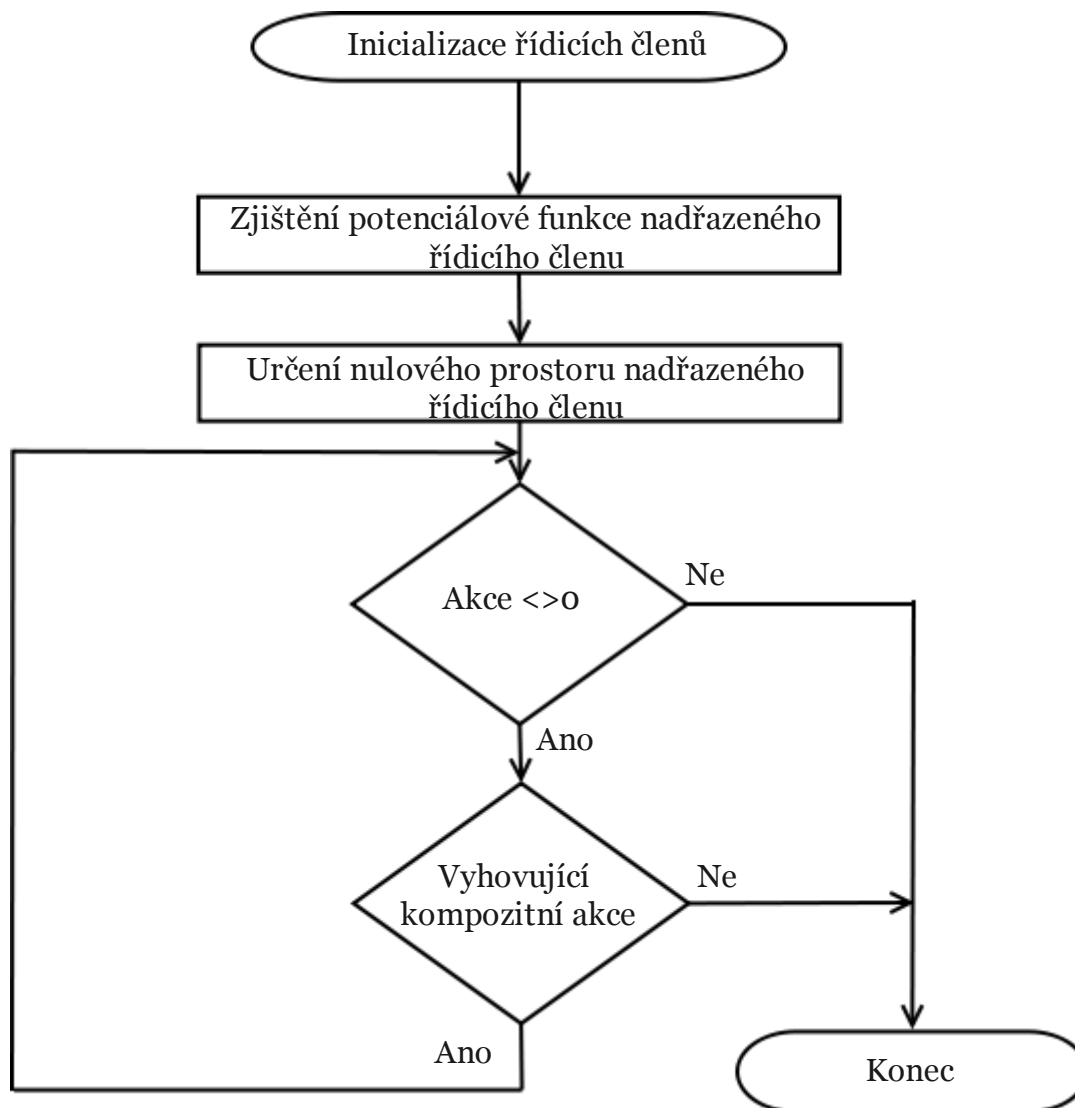
### 3.4.2 Kompozitní strategie

Princip kompozitní strategie bude popsán na hierarchickém skládání akcí složeného řídicího členu.

Na začátku této kompozitní strategie se aktivují vybrané řídicí členy a hierarchicky se začlení do kompozitního řídicího členu. Dále je třeba zjistit akce a potenciálovou funkci nadřízeného řídicího členu a vytvořit nulový prostor pro práci podřízeného řídicího členu zobrazením akcí. V dalším kroku jsou pak hledány akce, které snižují potenciálovou funkci nadřízeného členu. Jestliže jsou takové akce nalezeny, tak kompozitní člen splnil cíl, jinak je proces neúspěšný (viz obr. 27).



Obr. 26 Trojúhelník statické stability (vrcholy 1, 2, 3) a prediktivní oblast pozice těžiště daná cílem řídicího členu (vrcholy 2, 3, 4)



Obr. 27 Algoritmus kompozitní strategie

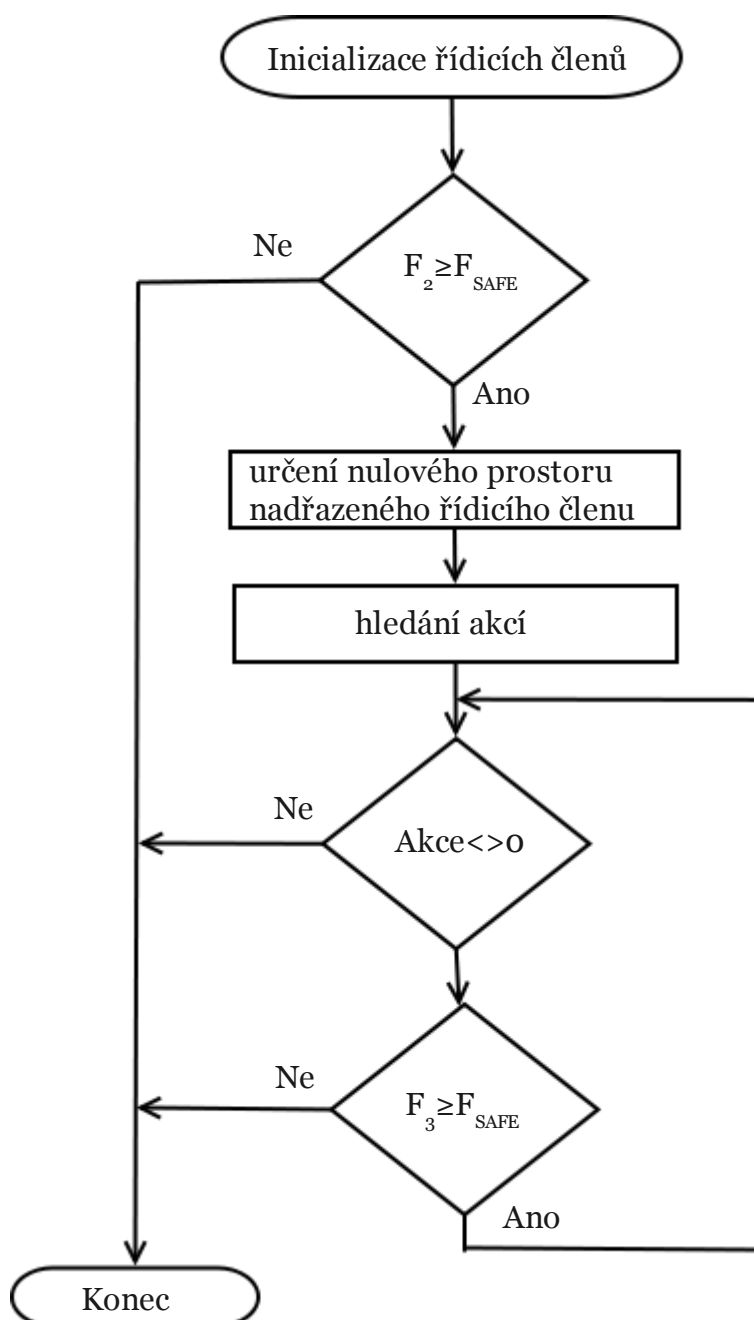
### 3.4.3 Algoritmus

Algoritmus složeného řídicího členu podle (60)

$$(\Phi_{14}^{3,4,1} \triangleleft \Phi_{14}^{2,3,4})$$

je zobrazen na obr. 28. Slovně může být algoritmus popsán následovně: Cílem řídicího členu je dosáhnout staticky stabilního postavení na nohách 2, 3 a 4 pohybem nohy 4. Aby mohla být noha č. 4 zvednuta, musí ležet těžiště robotu uvnitř trojúhelníku statické stability (trojúhelník s vrcholy 1, 2, 3, viz obr. 26). To je splněno za podmínky  $F_2 \geq F_{SAFE}$ . Reakce v protějščí noze  $F_2$  tedy nesmí být záporná a musí být větší než zvolená bezpečnostní síla  $F_{SAFE}$ . Protože v dalším kroku robotu bude zvednuta noha č. 1, je nutné simulovat postavení na nohách č. 2, 3, 4. Při této simulaci je kontrolována noha č. 3 podmínkou  $F_3 \geq F_{SAFE}$ . Pokud jsou tyto podmínky splněny je splněn i cíl složeného řídicího členu.

Jak je patrné z obr. 26, simultánní aktivací více než dvou řídicích členů kontaktu nelze nikdy dosáhnout cíle všech členů, protože není možné dosáhnout statické stability ve dvou protějšcích trojúhelnících.



Obr. 28 Algoritmus složeného řídicího členu podle (60)

### 3.4.4 Shrnutí

Současnou aktivací více řídicích členů je možné dosáhnout složitějšího chování. Takové aktivace mohou být spuštěny buď paralelně, nebo sériově pomocí hierarchického skládání základních řídicích členů. Při hierarchickém skládání řídicích členů je nutné zajistit, aby podřízený řídicí člen prováděl pouze akce, které nebudou omezovat dosažení cíle nadřazeného řídicího členu. Byl vytvořen algoritmus pro simultánní spouštění dvou řídicích členů kontaktu a jeho činnost byla dále vysvětlena na vývojovém diagramu, obr. 28.





## 4 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout a implementovat elementární zpětnovazební řídicí členy pro potřeby chůze čtyřnohého kráčivého robotu. Na základě rešeršní práce byly vybrány vhodné přístupy řešení pro jednotlivé řídicí členy, které byly dále implementované na matematickém modelu robotu vytvořeném v programu MATLAB.

Mezi základní zpětnovazební řídicí členy patří řídicí člen polohy ( $\Phi_0$ ), kontaktu ( $\Phi_1$ ) a držení těla ( $\Phi_2$ ), přičemž tato práce řeší implementaci řídicího členu kontaktu a držení těla. Tyto členy jsou sestaveny do tzv. báze řízení, s níž lze řešit obecné úlohy řízení robotu simultánní kombinací obsažených řídicích členů. Výhodou těchto elementárních členů je jejich vyjádření ve formě nezávislé na kinematice a geometrii robotu, což umožňuje jejich použití i pro jiné typy robotů a různé úlohy.

Pro potřeby návrhu bylo nutné zavést několik souřadných systémů, které umožnily snazší orientaci ve výpočtech matematického modelu. Zavedení těchto souřadných systémů je popsáno v kapitole 3.1.

Návrh a implementace řídicího členu kontaktu ( $\Phi_1$ ) jsou popsány v kapitole 3.2. Úkolem tohoto řídicího členu je minimalizace zbytkových sil a momentů v těžišti robotu, čímž se dosáhne splnění kritéria trojúhelníkové statické stability. V této diplomové práci je minimalizace zbytkových sil a momentů řešena pomocí manipulace jedné nohy robotu.

Na základě rešeršní studie byl vybrán přístup řešení řídicího členu kontaktu podle rovnice (11) s vlastním řešením matematického modelu výpočtu protilehlé reakce v došlapu, která je pro řešení rovnice (11) nezbytná. Aby bylo možné spustit různé instance řídicího členu kontaktu, je nutné nejdříve ověřit, zda platí podmínka (20). Tedy, zda je velikost reakce v došlapu protilehlé nohy, oproti noze se kterou manipulujeme, větší než zvolená bezpečnostní síla.

Výsledné řešení bylo dále graficky ověřeno na různých konfiguracích noh robotu (viz příloha 1). Jak je patrné z grafů na *Obr. 9 - 12*, výsledný průběh potenciálových funkcí všech testovaných konfigurací je klesající, s jedním globálním minimem. Což je vhodný tvar potenciálové funkce a umožňuje řídicímu členu snadno konvergovat k tomuto minimu a tím dosáhnout cíle řídicího členu - posunout bod došlapu manipulované nohy do tohoto minima a tím splnit kritérium trojúhelníkové statické stability.

Cíle řídicího členu kontaktu je v této práci dosahováno pomocí manipulace jedné nohy. Jinou možností, jak splnit kritérium trojúhelníkové stability, by mohlo být například řešení translačním posuvem těla robotu se zachováním bodů došlapu všech čtyř noh.

V následující kapitole 3.3 je řešen návrh a implementace řídicího členu držení těla ( $\Phi_2$ ). Cílem tohoto členu je snaha udržet takový postoj robotu, ve kterém jsou úhly noh dostatečně vzdáleny od svých mezních hodnot a tím mají nohy maximální pracovní prostor pro další pohyb robotu. Zde byl vybrán přístup založený na maximalizaci heuristické míry postoje - manipulovatelnosti, viz rovnice (12), (30) - a řešeny byly tři způsoby dosažení maximální míry postoje robotu při zachování bodů došlapu jednotlivých noh:

1. rotací těla robotu kolem osy  $z$

2. posunem těla v rovině  $x-y$
3. změnou výšky těla robotu – posunem v ose  $z$

Aby bylo možné určit heuristickou míru postoje, byl nejdříve vytvořen matematický model pro získání velikostí úhlů robotu při různých konfiguracích. Následně byly graficky ověřovány na různých konfiguracích noh robotu průběhy heuristické míry pro jednotlivé způsoby popsané výše.

Pro první způsob dosažení maximální míry, rotaci těla robotu kolem osy  $z$ , je z grafických průběhů na *obr. 14 - 18* patrné, že potenciálová funkce má globální maximum a tedy výhodný tvar pro maximalizaci heuristické míry postoje. Pokud bude mít robot jednu z noh ve své mezní poloze, viz graf na *obr. 15* pro konfiguraci noh č. 3 (viz příloha 1), je z grafů patrné umístění počátku natáčení na jedné straně grafu. Z čehož vyplývá, že je možné natáčení těla pouze na jednu stranu.

Grafy na *obr. 19 - 24* ilustrují grafické průběhy pro druhý způsob dosažení maximální míry, a to posunem těla robotu v rovině  $x-y$ . Opět je patrný průběh funkce s jedním globálním maximem, což je vhodný tvar zvolené potenciálové funkce. Počátek souřadného systému je zde umístěn do těžiště robotu. Jak je opět vidět pro mezní konfiguraci robotu č. 3 na *obr. 21* má robot omezenou pohyblivost v ose  $x$ .

Porovnáváním výsledných hodnot heuristické míry postoje (viz *tab. 1* a *tab. 2*) pro uvedené dva způsoby dosažení maximální heuristické míry pro jednu konfiguraci robotu bylo zjištěno, že se mohou maximální hodnoty značně lišit. Například pro konfiguraci robotu č. 4 bylo dosaženo rotací těla robotu hodnoty 0,18, zatímco posunem v rovině  $x-y$  bylo dosaženo hodnoty heuristické míry 0,5. Z čehož vyplývá, že v tomto případě budou mít nohy robotu větší pracovní prostor pro další pohyb použitím druhého navrženého způsobu dosažení maximální hodnoty, tedy posunem těla robotu v rovině  $x-y$ .

Posledním řešeným způsobem, jak dosáhnout maximální míry postoje je změna výšky těla robotu, tedy posuv v ose  $z$ . Tento způsob znázorňuje graf na *obr. 25*. Z něho je patrné, že do určité výšky těla robotu nad vodorovným povrchem heuristická míra roste, pak již klesá. Tedy existuje taková výška, při které je hodnota maximální.

Maximální heuristické míry je v této práci dosahováno při zachování bodů došlapu jednotlivých noh. Optimalizovány jsou tedy všechny nohy najednou. Nabízí se tedy zpracování řešení maximalizace míry pro každou nohu zvlášť.

Poslední kapitola 3.4 se zabývá návrhem a algoritmizací složeného řídicího členu. Současnou aktivací více řídicích členů je možné dosáhnout složitějšího chování. Takové aktivace mohou být spuštěny buď paralelně, nebo sériově pomocí hierarchického skládání základních řídicích členů. Při hierarchickém skládání řídicích členů je nutné zajistit, aby podřízený řídicí člen prováděl pouze akce, které nebudou omezovat dosažení cíle nadřazeného řídicího členu. Toho je zde dosahováno pomocí tzv. nulového prostoru. V této kapitole byl vytvořen algoritmus pro simultánní spouštění dvou řídicích členů kontaktu (60). Jeho činnost byla dále vysvětlena na vývojovém diagramu, *obr. 28*.

Autor považuje tímto cíle diplomové práce za splněné. Navržené řešení základních řídicích členů kontaktu a postoje je vyjádřeno ve formě nezávislé na kinematice a geometrii robotu. Lze jej tedy v budoucnu použít s výhodou i pro jiné typy čtyřnohých kráčivých robotů.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Bor K.: Návrh a implementace kompozitního řídicího členu chůze 4-nohého robotu. Diplomová práce. Brno: VUT, FSI, 2004. 57 p.
- [2] Huber M.: A Hybrid Architecture for Adaptive Robot Control. University of Massachusetts, 2000, , pp. 129
- [3] Klein, Charles A.; Chung, Tae-Sang: Force Interaction and Allocation for the Legs of a Walking Vehicle. IEEE JOURNAL OF ROBOTICS AND AUTOMATION, December 1987, VOL. RA-3, NO. 6, pp. 546-555
- [4] Isaac, Thomas: The History of Walking Robots [online], 2004, [cit.2010-19-01]. Dostupné z: <<http://www.runtheplanet.com/resources/historical/walkingrobots.asp>>
- [5] Paluska, D.; Mataric M.; Ambrose R.: Biologically inspired intelligent robots. . SPIE Press, May 2003, Vol. PM122, pp. 2 - 4
- [6] Ridderström, Ch.: Legged locomotion: Balance, control and tools-from equation to action. Department of Machine Design Royal Institute of Technology, 2003, pp. 45-90
- [7] Grupen R. A.; Huber M.; MacDonald W. S.: A Control Basis for Multilegged Walking. University of Massachusetts, 1995, , pp. 1-6
- [8] Ondroušek V.: Návrh a implementace koordinačního mechanismu řídicích členů chůze čtyřnohého robotu. Diplomová práce. : VUT, FSI, 2004. 65 p.
- [9] Macdonald, W. S.: Legged Locomotion over Irregular Terrain using the Control Basis Approach. University of Massachusetts, Department of Computer Science, May 1996, pp. 72
- [10] Connolly Ch. I.; Grupen R. A: Applications of Harmonic Functions to Robotics. University of Massachusetts, 1992, pp. 31
- [11] Coelho J. A.; Grupen R. A.: Effective Multifingered Grasp Synthesis. University of Massachusetts, 1994, , pp. 46
- [12] Grupen R.A., Souccar K.: Manipulability-based Spatial Isotropy: A Kinetic Reflex. MCPA'93 International Workshop on Mechatronical Computer Systems for Perception an Action, 1993, , pp. 7
- [13] Murray R. M.; Li Z.; Sastry S. S.: A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation. CRC Press, 1994, , pp. 474
- [14] Lynxmotion, Inc.: Robot EQ3-KT [online], 2006, [cit.2010-25-01]. Dostupné z: <<http://www.lynxmotion.com>>



## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

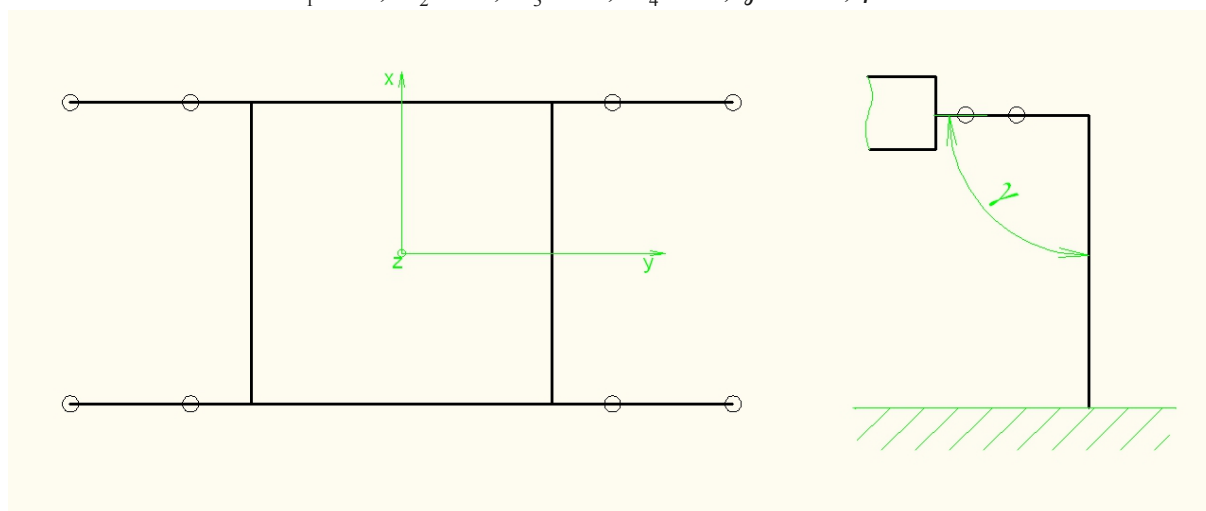
$\alpha$	úhel natočení celé nohy
$\beta$	úhel mezi kyčlí a stojkou
$\gamma$	úhel mezi stojkou a lýtkem
$A, A', A''$	kloubové spojení nohy a těla robotu (SSo, SS1, SS2)
$N, N', N''$	bod došlapu (SSo, SS1, SS2)
$M, M', M''$	kloubové spojení stojky a kyčle (SSo, SS1, SS2)
$P, P', P''$	kloubové spojení stojky a lýtky (SSo, SS1, SS2)
$a$	rozměr kyčle
$b$	rozměr stojky
$c$	rozměr lýtky
$\varphi$	úhel natočení těla robotu
$\delta x$	velikost změny posunu těla robotu v ose x
$\delta y$	velikost změny posunu těla robotu v ose y
$k_1$	kružnice $k_1$
$k_2$	kružnice $k_2$
$X$	pomocný bod při výpočtu průniku kružnic $k_1$ a $k_2$
$v$	výška v trojúhelníku MNP
$d$	spojnice středů kružnic $k_1$ a $k_2$
$m, n$	pomocné rozměry při výpočtu průniku kružnic $k_1$ a $k_2$
$S$	obecný konfigurační prostor
$A_i$	výstupní prostor
$E$	nulový prostor
$\vec{\rho}$	zbytkový vektor natočení
$G_i$	gradient uchopení
$\kappa_F, \kappa_M$	aktivační koeficienty
$p_i$	index manipulovatelnosti nohy $i$
$\varepsilon$	zbytkový krouticí moment
$\theta_{\varepsilon_{ij}}$	úhel kloubového spojení nohy $i$ a kloubu $j$
$\Phi$	zákon řízení
$\Phi_1$	řídící člen kontaktu
$\Phi_2$	řídící člen držení těla
$\sigma$	vstupní zdroje zákona řízení
$\tau$	výstupní zdroje zákona řízení

$C_m$	množina zpětnovazebních řídicích členů
$F_{SAFE}$	bezpečnostní síla
$F_i$	síla v došlapu nohy $i$ ( $i=1, 2, 3, 4$ )
$F_x$	reakce v došlapu protější nohy
$F_T$	tíhová síla těla robotu
$F_{Tki}, F_{Tli}, F_{Tsi}$	tíhová síla kyčle, lýtky, stojky nohy $i$ ( $i=1, 2, 3, 4$ )
$F_G$	celková gravitační síla
$x_T$	poloha těžiště v ose $x$
$y_T$	poloha těžiště v ose $y$
$x_{ki}, x_{si}, x_{li}$	vzdálenosti působišť tíhových sil kyčle, stojky a lýtky v ose $x$
$y_{ki}, y_{si}, y_{li}$	vzdálenosti působišť tíhových sil kyčle, stojky a lýtky v ose $y$
$m_T$	hmotnost těla robotu
$m_{ki}, m_{si}, m_{li}$	hmotnosti jednotlivých článků noh (kyčle, stojky, lýtky)

## PŘÍLOHA 1: KONFIGURACE ROBOTU

### Konfigurace č. 1

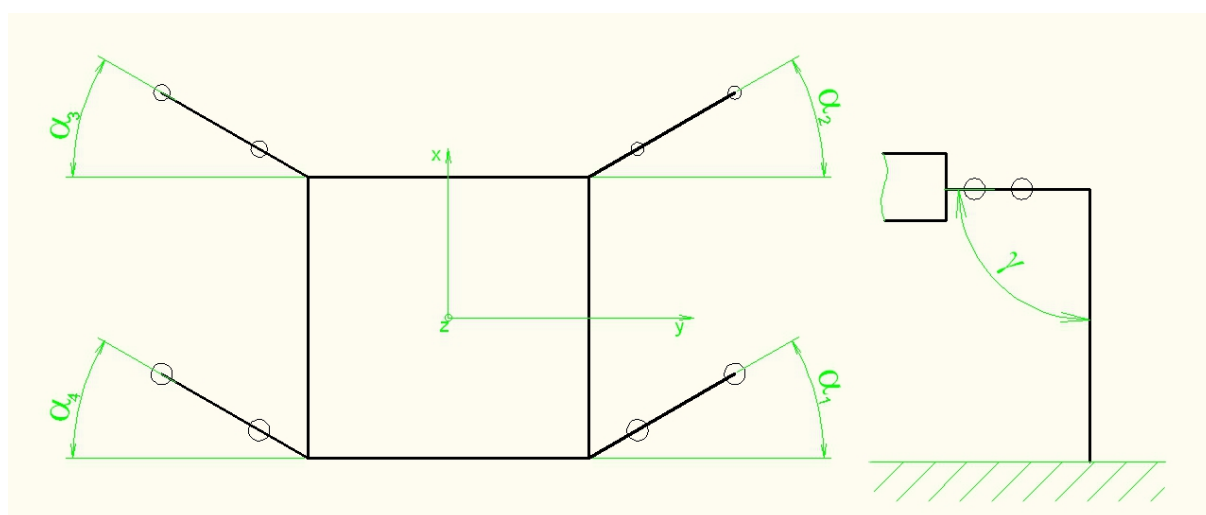
$$\alpha_1=0^\circ, \alpha_2=0^\circ, \alpha_3=0^\circ, \alpha_4=0^\circ, \gamma=90^\circ, \beta=0^\circ$$



Obr. 29 Konfigurace robotu č. 1

### Konfigurace č. 2

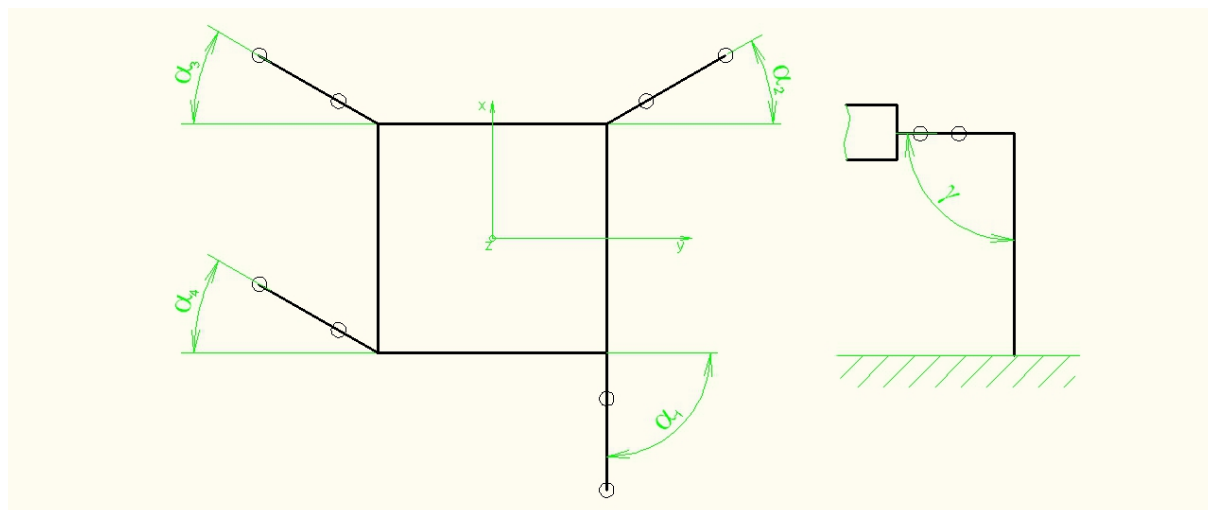
$$\alpha_1=-30^\circ, \alpha_2=-30^\circ, \alpha_3=30^\circ, \alpha_4=30^\circ, \gamma=90^\circ, \beta=0^\circ$$



Obr. 30 Konfigurace robotu č. 2

**Konfigurace č. 3**

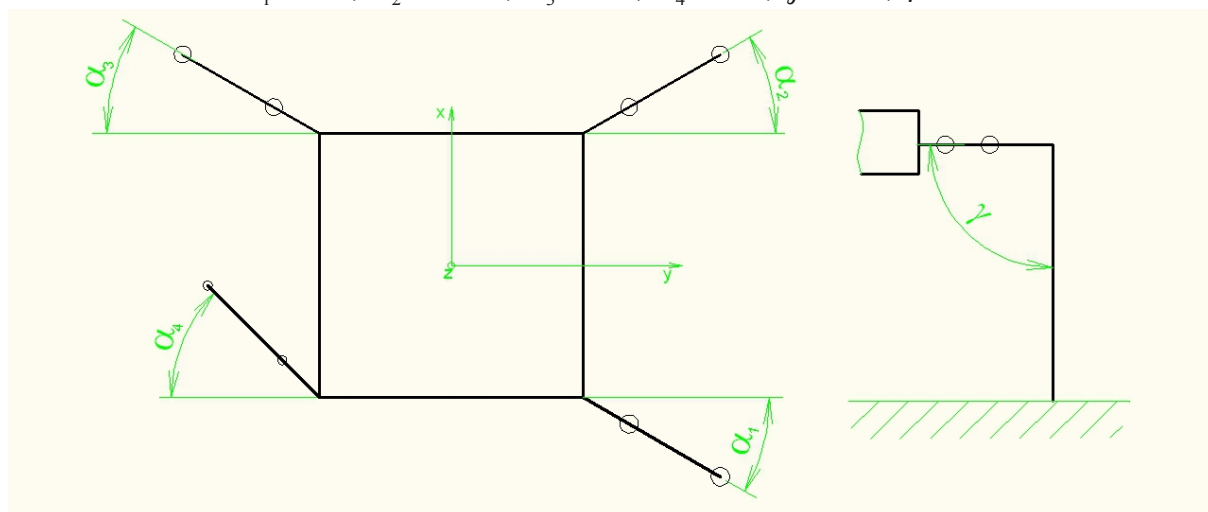
$$\alpha_1=90^\circ, \alpha_2=-30^\circ, \alpha_3=30^\circ, \alpha_4=30^\circ, \gamma=90^\circ, \beta=0^\circ$$



Obr. 31 Konfigurace robotu č. 3

**Konfigurace č. 4**

$$\alpha_1=30^\circ, \alpha_2=-30^\circ, \alpha_3=30^\circ, \alpha_4=45^\circ, \gamma=90^\circ, \beta=0^\circ$$

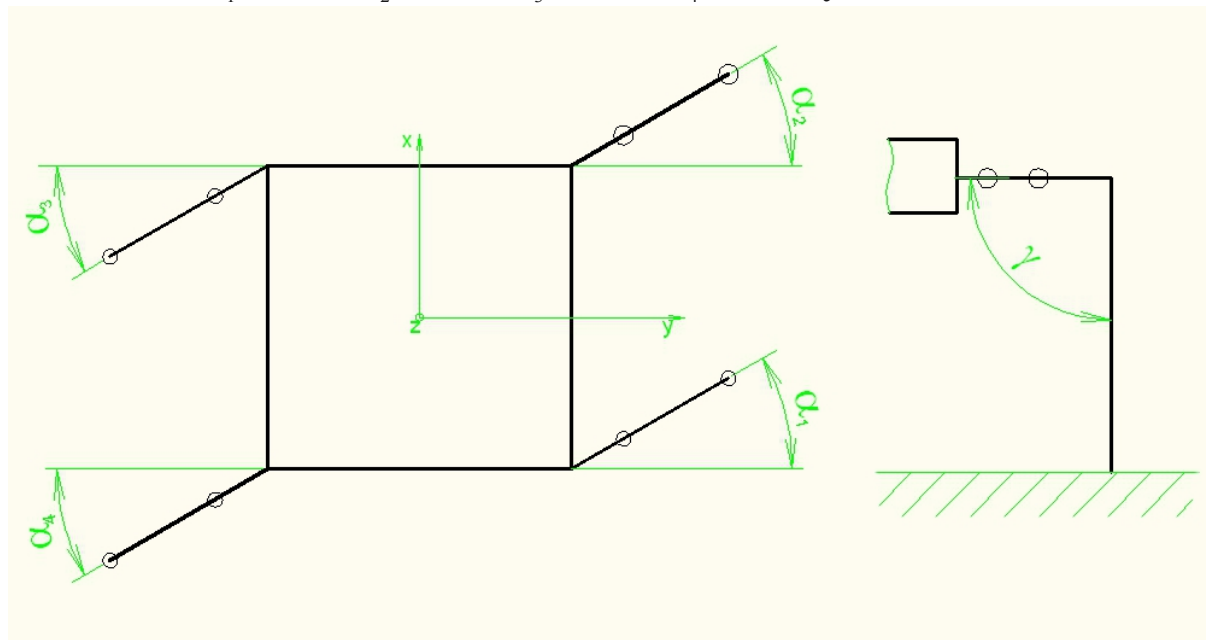


Obr. 32 Konfigurace robotu č. 4



**Konfigurace č. 5**

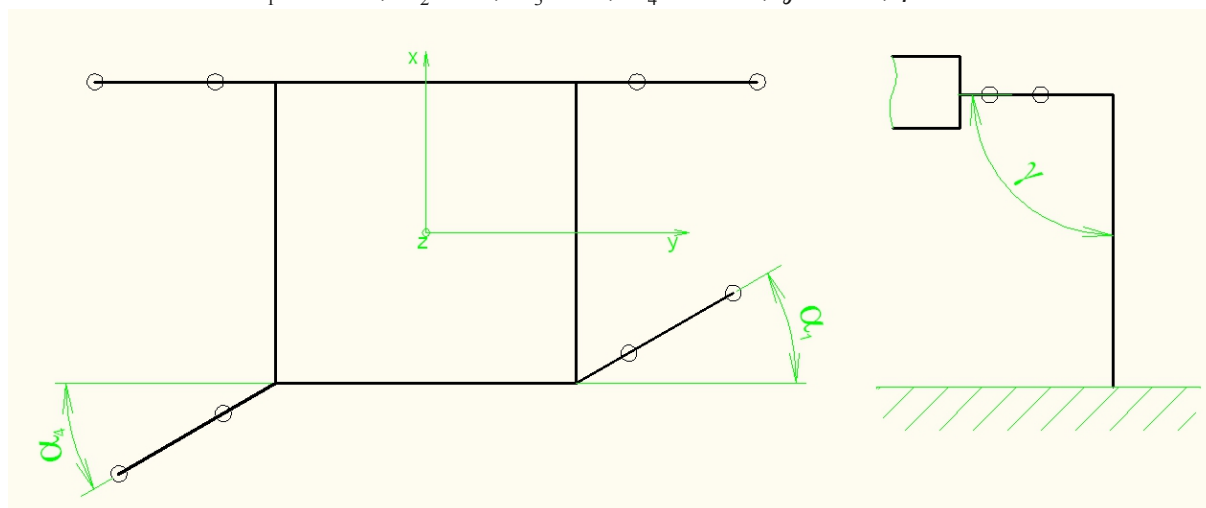
$$\alpha_1 = -45^\circ, \alpha_2 = -45^\circ, \alpha_3 = -45^\circ, \alpha_4 = -45^\circ, \gamma = 90^\circ, \beta = 0^\circ$$



Obr. 33 Konfigurace robotu č. 5

**Konfigurace č. 6**

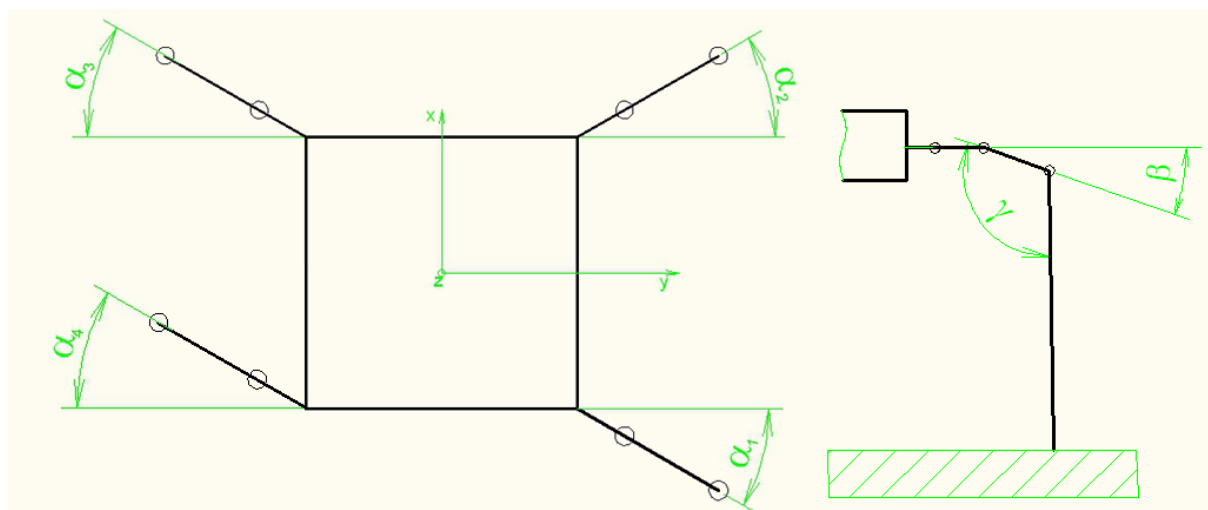
$$\alpha_1 = -30^\circ, \alpha_2 = 0^\circ, \alpha_3 = 0^\circ, \alpha_4 = -30^\circ, \gamma = 90^\circ, \beta = 0^\circ$$



Obr. 34 Konfigurace robotu č. 6

**Konfigurace č. 7**

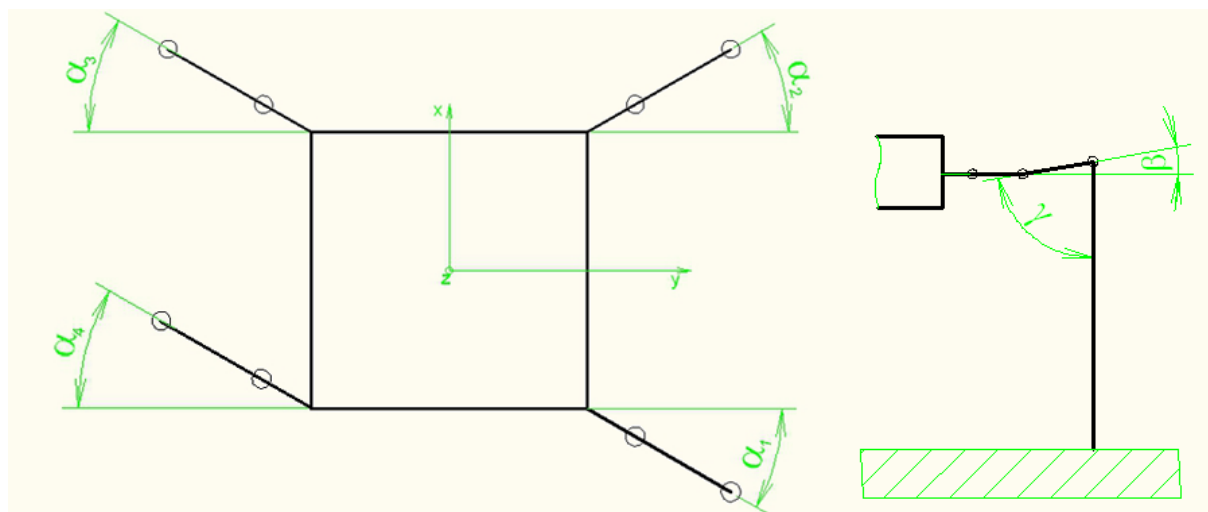
$$\alpha_1 = -30^\circ, \alpha_2 = -30^\circ, \alpha_3 = 30^\circ, \alpha_4 = 30^\circ, \gamma = 110^\circ, \beta = 30^\circ$$



Obr. 35 Konfigurace robotu č. 7

**Konfigurace č. 8**

$$\alpha_1 = -30^\circ, \alpha_2 = -30^\circ, \alpha_3 = 30^\circ, \alpha_4 = 30^\circ, \gamma = 80^\circ, \beta = 20^\circ$$



Obr. 36 Konfigurace robotu č. 8